LUIS ANTONIO BANDEIRA NETO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA TÉRMICA DE FUNDAÇÕES POR
ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO NÃO SATURADO.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Geotecnia

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

Versão Corrigida

A versão original se encontra na Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos-SP

2015

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

B214e Bandeira Neto, Luis Antonio
ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA TÉRMICA DE
FUNDAÇÕES POR ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO NÃO
SATURADO / Luis Antonio Bandeira Neto; orientador
Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos,
2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. energia geotérmica. 2. fundações por estacas
trocadoras de calor. 3. ensaio de resposta térmica. 4.
solo não saturado. 5. clima subtropical. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIS ANTONIO BANDEIRA NETO**.

Título da dissertação: "Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado".

Data da defesa: 08/12/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Titular **Heraldo Luiz Giacheti**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovado

Prof. Dr. **Sebastien Burlon**
(Université Paris Tech)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

À Luiz Felipe Bastardo Gaelzer (in memorian),
Irmão que o destino levou mais cedo,
Estendendo o tapete para aqueles que virão depois.

Obrigado por Tudo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Agradeço a Prof^a Dra^a Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha, pela orientação, paciência e sobretudo a amizade, apoio e confiança transmitidos do início ao final da produção deste trabalho.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro fornecido para a realização dos ensaios e medidas que possibilitaram a realização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento a Pesquisa (CAPES) pela concessão da bolsa durante o mestrado.

Agradeço aos colegas do departamento de Geotecnia da EESC/USP. Professores, alunos e funcionários, pelos agradáveis momentos e valiosas discussões dentro e fora do ambiente de trabalho.

Agradeço aos técnicos do laboratório: Zé Luis, Dito, Oscar e Antônio por todo o auxílio e apoio, tanto durante a realização das disciplinas do mestrado como na realização de tarefas relativas a este trabalho.

Aos colegas de turma do mestrado: Lucas Nascimento, Lucas Schettini, Juliana, Roberto, Bianca e João, pelas conversas, discussões e agradável convivência, principalmente na fase das disciplinas realizadas.

Em especial, agradeço aos colegas João Sampaio, Thaise Moraes e José Antônio Schiavon, pelo incondicional apoio na realização deste trabalho e pela alegria de espírito, que tornou muito mais agradáveis as longas horas de ensaios e tarefas realizados.

Agradeço as equipes Polo Aquático São Carlos e Handebol CAASO, por me acolherem desde anos anteriores e me ensinarem tanto durante todo esse tempo, e ainda servirem de válvula de escape do stress em tantos momentos importantes.

Agradeço a minha família de São Carlos, irmãos de alma da República Mau Exemplo e agregados. Família que tenho orgulho de dizer que ajudei a criar, muito importante para o término deste trabalho, principalmente nos pontos alheios a ele.

Em especial, agradeço as minhas mães de São Carlos, Cícera e Manuela, pelo carinho, atenção e amizade todos esses anos.

Agradeço, finalmente, a minha família de sangue. Minha mãe Maria Mercês, meu pai Luis Antonio e minha irmã Lucila. O pilar fundamental que sustenta todas as conquistas e alegrias presentes na minha vida.

RESUMO

BANDEIRA NETO, L. A. **Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado**. 2015. 130 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O estudo experimental apresentado nesta dissertação foi realizado para avaliar a resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor, que podem ser usadas para reduzir o elevado consumo de energia em sistemas de condicionamento de ar no Brasil. A principal motivação para a produção deste trabalho foi a ausência de estudos sobre o desempenho térmico de estacas e/ou furos trocadores de calor em solo tropical, que é muito comum em nosso país. Para esta pesquisa, cinco ensaios de resposta térmica (TRT) foram realizados no Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo em São Carlos/SP, Brasil. A camada de solo superficial deste terreno consiste de solo tropical não saturado, composto de areia argilosa coluvial (laterítico) sobre um solo residual de arenito (saprolito). O ensaio *in situ* denominado TRT é o método experimental mais comum para a determinação das propriedades térmicas de sistemas de fundações por estacas trocadoras de calor. Os experimentos foram realizados em duas estacas escavadas, com 12m de profundidade, equipadas com tubos trocadores de calor, instaladas em uma camada de solo com temperatura média em torno de 24 °C. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a performance de estacas trocadoras de calor na condição de solo e clima investigados (alta temperatura do solo, solo laterítico não saturado com alta porosidade próximo a superfície). Também foram verificados os efeitos da posição do nível d'água, da vazão da água circulante na estaca, e da duração do ensaio nas propriedades térmicas das estacas trocadora de calor avaliadas. Os resultados encontrados da taxa de troca de calor por metro de estaca neste estudo variam 79 a 110 W/m, portanto, estas estacas mostram bom potencial de transferência de calor no local investigado. Os resultados desse estudo fornece informações úteis para a avaliação da eficiência de estacas trocadoras de calor como um sistema de refrigeração em regiões tropicais e subtropicais brasileiras.

Palavras chaves: energia geotérmica, fundações por estacas trocadoras de calor, ensaio de resposta térmica, solo não saturado, clima subtropical.

ABSTRACT

BANDEIRA NETO, L.A. An experimental study of the thermal response of heat exchanger piles in unsaturated tropical soil. 2015. 130 p. Master Thesis-University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, 2015.

Brazil is the fifth largest buyer of air conditioner in the world because of its tropical and subtropical climate. To address this problem, the current experimental study was carried out to evaluate the thermal response of energy piles that can be used to reduce the high energy consumption in cooling systems in Brazil. The key factor that motivates this study is that unsaturated tropical soils cover a significant part of the Brazilian territory, and the thermal performance of heat exchanger piles in typical Brazilian soil and climate has not been investigated before. Five Thermal Response tests (TRT) were conducted for this research in the Geotechnical research field of the University of São Paulo at São Carlos/SP, Brazil, of unsaturated tropical soil, including a superficial layer composed of colluvial clayey sand (lateritic) overlaying in a residual sandstone soil (saprolitic). Thermal response tests are the most common experimental method for determining thermal properties of the energy foundation systems. The tests were performed on two drilled piles of 12m length equipped with heat transfer pipes, installed a soil layer with average temperature of 24°C. The main objective of this work was to obtain some data about the thermal energy delivery of energy piles in the soil and climate condition investigated herein (high ground temperature, unsaturated and tropical soil with high porosity). The effects of ground water table, flow rate, duration of test, and number of heat exchanger U-pipes on the thermal properties of the energy pile were also evaluated in this study. The thermal parameters obtained allowed a first evaluation about the thermal efficiency of the piles in the particular soil. The results of heat exchange rate found in this study vary from 79 to 110 W/m, therefore energy piles installed in the investigated site show good heat transfer potential. This study provides interesting information to the evaluation of heat exchange efficiency in energy foundations to be used as a cooling system in tropical and subtropical Brazilian regions.

Keywords: geothermal energy, heat exchanger piles, thermal response test, unsaturated soil, subtropical climate.

Lista de Figuras

FIGURA 1: COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA CONFORME A PROFUNDIDADE DO SUBSOLO. (BRANDL 2006).	22
FIGURA 2: SISTEMA COMPOSTO POR ESTACAS TROCADORAS DE CALOR PARA A CLIMATIZAÇÃO DE AMBIENTES.	23
FIGURA 3: GRÁFICO MOSTRANDO O ACENTUADO CRESCIMENTO DO USO DE ESTACAS TROCADORAS DE CALOR NA ÁUSTRIA (BRANDL 2006)..	24
FIGURA 4: AMPLITUDE DAS TEMPERATURAS EM OTTAWA OBSERVADAS DURANTE UM ANO. (VILELA 2004)..	31
FIGURA 5: TEMPERATURAS NO SUBSOLO DE CLAYTON DURANTE 8 MESES. (WANG ET AL. 2013)..	31
FIGURA 6: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA DE CALOR. (ADAPTADO BRANDL 2006)..	33
FIGURA 7: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO SAZONAL DE GSHP FECHADO. (KATZENBACH ET AL. 2012)..	34
FIGURA 8: CONFIGURAÇÕES DE TUBULAÇÕES SUBTERRÂNEAS HORIZONTAIS, VERTICAIS E EM LAGOS. (VILELA 2004)..	35
FIGURA 9: SISTEMAS DE TUBULAÇÃO ABERTA. A- FONTE NO SUBSOLO E DESCARTE EM LAGO. B- FONTE E DESCARTE NO MESMO LENÇOL DO SUBSOLO. (VILELA 2004)..	36
FIGURA 10: À ESQUERDA, TUBOS DE PEAD ACOPLADOS NA ARMADURA DA ESTACA. À DIREITA, INSTALAÇÃO DA MESMA ARMADURA. (KATZENBACH ET AL. 2011)..	37
FIGURA 11: ESQUEMA DE ELABORAÇÃO DO ENSAIO T.R.T (GEHLIN 2002)..	41
FIGURA 12: EXEMPLO DE PROJETO DE UM EQUIPAMENTO DE T.R.T. (ECES 2013)....	42
FIGURA 13: EQUIPAMENTO DE ENSAIO TRT MONTADO NA SUÉCIA (GEHLIN 2002)....	43
FIGURA 14: MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NÃO PERTURBADA DO SUBSOLO ATRAVÉS DA CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (ECES 2013).....	45
FIGURA 15: GRÁFICO DAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS OBTIDAS EM 4 ENSAIOS T.R.T. DE ACORDO COM O TEMPO DE EXECUÇÃO (LHENDUP 2014).....	47
FIGURA 16: GRÁFICO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS OBTIDAS NOS TRTS DE ACORDO COM O TEMPO DE EXECUÇÃO EM CADA UM (LHENDUP 2014).....	47
FIGURA 17: EXEMPLO DE RESULTADO DE T.R.T. COM TEMPO NA ESCALA LOGARÍTMICA (CEN/TC 341 N525 2011).	49
FIGURA 18: EXEMPLO DE RESULTADO DE T.R.T. COM TEMPO NA ESCALA NORMAL (CEN/TC 341 N525 2011).	50
FIGURA 19: POTENCIAL DO TERRENO PARA CLIMATIZAÇÃO GEOTÉRMICA DE ACORDO COM O SISTEMA GEOTÉRMICO UTILIZADO (OLGUN & MCCARTNEY, 2014).	57
FIGURA 20: EFEITO DA DISTÂNCIA ENTRE OS TUBOS NA EFICIÊNCIA DA TROCA DE CALOR DA ESTACA PARA SIMPLES U-LOOP, DUPLO U-LOOP E TRIPLO U-LOOP (BIDARMAGHZ ET AL 2014).	58
FIGURA 21: EFEITO DA VARIAÇÃO DA VAZÃO DO FLUIDO DENTRO DA ESTACA NA TAXA DE TROCA DE CALOR, AVALIADO POR MODELO NUMÉRICO. (BIDARMAGHZ ET AL 2014).....	59
FIGURA 22: INFORMAÇÕES DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE SÃO CARLOS - SP. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: PERFIL DO SUBSOLO, DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS E ÍNDICE DE VAZIOS, DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE (MACHADO & VILAR, 2003).....	64

FIGURA 23: RESULTADOS DE ENSAIOS DE CAMPO REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL (MACHADO & VILAR (2003) APUD MENEGOTTO & VIANNA (2000) E GIACHETTI (2001).	64
FIGURA 24: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL (VILAR ET AL 1985).	66
FIGURA 25: EXECUÇÃO DO POÇO DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA.	67
FIGURA 26: LOCAÇÃO DAS ESTACAS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES DA EESC/USP.	68
FIGURA 27: COLOCAÇÃO DOS TUBOS PEAD NA ARMADURA DA ESTACA	69
FIGURA 28: DETALHE DA PARTE INFERIOR DO "U" LOOP DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUA DENTRO DA ESTACA. ESQUEMA MONTADO COM TUBULAÇÃO DE PVC PRÓPRIO PARA ÁGUA QUENTE.	69
FIGURA 29: TUBOS COLOCADOS NA ARMADURA DO FURO DO TRT.	70
FIGURA 30: ADAPTAÇÃO PARA A CURVA EM "U" DO TUBO, FEITA EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA QUENTE.	70
FIGURA 31: INSTALAÇÃO DA CURVA UTILIZANDO ABRAÇADEIRAS, JÁ COM OS ADAPTADORES PARA CONECTAR AS MANGUEIRAS.	70
FIGURA 32: CONEXÃO DOS TUBOS NOS ADAPTADORES, UTILIZANDO SOPRADOR TÉRMICO E DEPOIS REFORÇO COM ABRAÇADEIRA METÁLICA.	71
FIGURA 33: ARMADURA FINALIZADA COM TUBOS AMARRADOS, PRONTA PARA SER INSERIDA NO FURO.	71
FIGURA 34: PERFURAÇÃO DOS FUROS DAS ESTACAS.	72
FIGURA 35: INSERINDO OS TUBOS NO FURO DA ESTACA 1.	72
FIGURA 36: FINALIZANDO A CONCRETAGEM DA ESTACA, COM O TUBO DE PVC PROTEGENDO OS SENSORES PT100.	73
FIGURA 37: DETALHE SENSOR PT100 PRESO NA ARMAÇÃO DA ESTACA 2.	73
FIGURA 38: CONTAINER DESTINADO A ABRIGAR OS EQUIPAMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DO TRT.	74
FIGURA 39: AQUECEDOR DE ACUMULAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO TRT..	75
FIGURA 40: BOMBA HIDRÁULICA KSB UTILIZADA NO PROJETO.	75
FIGURA 41: PRÉ-PROJETO HIDRÁULICO DO ESQUEMA DE ENSAIO (LUCCHESI 2014).	77
FIGURA 42: MODELOS DE MEDIDOR DE VAZÃO TIPO TURBINA.	79
FIGURA 43: MEDIDOR DE VAZÃO INSTALADO NO SISTEMA.	80
FIGURA 44: SENSOR PT 100 PEQUENO.	80
FIGURA 45: ESQUEMA DE MONTAGEM DOS SENSORES PT100 DENTRO DOS TUBOS.	81
FIGURA 46: SUPORTE DE APOIO PARA OS SENSORES DE TEMPERATURA INSTALADOS NO INTERIOR DA TUBULAÇÃO.	81
FIGURA 47: DETALHE DA LIGAÇÃO ENTRE AS MAGUEIRAS DE PEAD E AS PEÇAS DO SISTEMA, POR MEIO DE ADAPTADORES ESPIGÃO-ROSCA.	82
FIGURA 48: DETALHE DO ISOLANTE TÉRMICO DA TUBULAÇÃO.	82
FIGURA 49: PARTE SUPERIOR DO SISTEMA INTERNA AO CONTAINER. À ESQUERDA O AQUECEDOR, NO CENTRO A BOMBA HIDRÁULICA E LOGO A DIREITA O MEDIDOR DE VAZÃO.	83

FIGURA 50: TUBOS CONECTADOS NA ESTACA 1 (SIMPLES “U” LOOP) E NA ESTACA 2 (DUPLO “U” LOOP) PARA OS ENSAIOS TRT	83
FIGURA 51: CONEXÃO DA MANGUEIRA RESPONSÁVEL PELO ABASTECIMENTO DO ENSAIO.	84
FIGURA 52: DETALHE DO SENSOR PT 100 GRANDE.	84
FIGURA 53: FUROS ONDE FORAM INSTALADOS SENSORES PT 100.	85
FIGURA 54: SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UTILIZADO PARA ARMAZENAMENTO DOS DADOS DO ENSAIO.	85
FIGURA 55: SISTEMA DE AQUISIÇÃO EM FUNCIONAMENTO. IMAGEM TIRADA DURANTE ACESSO POR MONITORAMENTO REMOTO.	88
FIGURA 56: SATURAÇÃO DO SOLO EM TORNO DA ESTACA1 PARA O ENSAIO TRT-4.	91
FIGURA 57: TEMPERATURA DO SOLO NO TERRENO DO CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC.	95
FIGURA 58: VARIAÇÃO DO N.A. NO CAMPO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES DA EESC/USP	96
FIGURA 59: TEMPERATURAS REGISTRADAS DURANTE O ENSAIO TRT-1.	97
FIGURA 60: QUANTIDADE DE CALOR INJETADA NO SISTEMA DURANTE O ENSAIO TRT-1.....	97
FIGURA 61: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-1.	98
FIGURA 62: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DURANTE O ENSAIO TRT-1.....	98
FIGURA 63: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR DURANTE O ENSAIO TRT-1..	98
FIGURA 64: TEMPERATURAS REGISTRADAS DURANTE O ENSAIO TRT-2.	99
FIGURA 65: QUANTIDADE DE CALOR INJETADA NO SISTEMA DURANTE O ENSAIO TRT-2.....	100
FIGURA 66: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-2.	100
FIGURA 67: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DURANTE O ENSAIO TRT-2.....	100
FIGURA 68: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR DURANTE O ENSAIO TRT-2.	101
FIGURA 69: TEMPERATURAS REGISTRADAS DURANTE O ENSAIO TRT-3.	102
FIGURA 70: QUANTIDADE DE CALOR INJETADA NO SISTEMA DURANTE O ENSAIO TRT-3.....	102
FIGURA 71: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-3	102
FIGURA 72: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DURANTE O ENSAIO TRT-3.....	103
FIGURA 73: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR DURANTE O ENSAIO TRT-3.	103
FIGURA 74: TEMPERATURAS REGISTRADAS DURANTE O ENSAIO TRT-4.	104
FIGURA 75: QUANTIDADE DE CALOR INJETADA NO SISTEMA DURANTE O ENSAIO TRT-4.....	105
FIGURA 76 TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-4.	105
FIGURA 77: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DURANTE O ENSAIO TRT-4.....	105
FIGURA 78: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR DURANTE O ENSAIO TRT-4.	106
FIGURA 79: TEMPERATURAS REGISTRADAS DURANTE O ENSAIO TRT-5.	107

FIGURA 80: QUANTIDADE DE CALOR INJETADA NO SISTEMA DURANTE O ENSAIO TRT-5.....	107
FIGURA 81: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-5 (84 HORAS DESCARTADAS).....	108
FIGURA 82: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-5 (63 HORAS DESCARTADAS).....	108
FIGURA 83: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-5 (42 HORAS DESCARTADAS).....	108
FIGURA 84: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-5 (21 HORAS DESCARTADAS).....	109
FIGURA 85: TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO X LN(T) PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ENSAIO TRT-5 (10.5 HORAS DESCARTADAS).....	109
FIGURA 86: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DURANTE O ENSAIO TRT-5.....	109
FIGURA 87: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR DURANTE O ENSAIO TRT-5.	110
FIGURA 88: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DENTRO DA ESTACA DURANTE O ENSAIO TRT-5.....	111
FIGURA 89: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO SOLO A UMA DISTÂNCIA RADIAL DE 1M DO EIXO DA ESTACA DURANTE O ENSAIO TRT-5.....	112
FIGURA 90: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO SOLO A UMA DISTÂNCIA RADIAL DE 2M DO EIXO DA ESTACA DURANTE O ENSAIO TRT-5.....	112
FIGURA 91: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA ESTACA APÓS O TERMINO DO ENSAIO TRT-5.....	113
FIGURA 92: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO SOLO A 1M DISTANTE DA ESTACA APÓS O TERMINO DO ENSAIO TRT-5.....	114
FIGURA 93: VARIAÇÃO DA TAXA DE TROCA DE CALOR POR METRO COM A VAZÃO DO FLUIDO.....	116
FIGURA 94: VARIAÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DO FLUIDO ($T_{IN} - T_{OUT}$) COM A VAZÃO.	117
FIGURA 95: RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DESCARTADO DE ENSAIO (HORAS) COM O COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO E COM A CONDUTIVIDADE.	117

Lista de Tabelas

TABELA 1: PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNS TIPOS DE SOLO OBTIDAS NA LITERATURA (LHENDUP 2014).	39
TABELA 2: DADOS DE ENTRADA NECESSÁRIOS PARA UTILIZAR CADA UMA DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE UM ENSAIO T.R.T. (GHELIN & HELLSTRÖM 2003).	56
TABELA 3: RESULTADOS DE ENSAIOS THERMAL RESPONSE TEST EM DIFERENTES PAÍSES.	61
TABELA 4: PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS QUE COMPÕES UM SOLO (FAROUKI 1981).	65
TABELA 5: PROPRIEDADES DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL SEGUNDO A PROFUNDIDADE, OBTIDOS ATRAVÉS DE AMOSTRAS INDEFORMADAS (CAVALCANTE ET AL 2007).	65
TABELA 6: PERDAS DE CARGA LOCAIS DO SISTEMA.	78
TABELA 7: DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS TRT REALIZADOS NESTE PESQUISA.	92
TABELA 8: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NO TRT-1 (21 HORAS DESCARTADAS).	96
TABELA 9: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NO TRT-2 (21 HORAS DESCARTADAS)	101
TABELA 10: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NO TRT-3 (21 HORAS DESCARTADAS)	103
TABELA 11: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NO TRT-4 (21 HORAS DESCARTADAS).	106
TABELA 12: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NO TRT-5 (DIFERENTES PERÍODOS DESCARTADOS).	110
TABELA 13: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS TRT	115
TABELA 14: RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA OBTIDOS EM ESTUDOS ANTERIORES.	118

Sumário

1- INTRODUÇÃO	21
1.1-OBJETIVOS.....	25
1.1.1- OBJETIVO GERAL.....	25
1.1.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1-ENERGIA GEOTÉRMICA.....	29
2.2-BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.....	32
2.2.1- BOMBAS DE CALOR	32
2.2.2- SISTEMAS GROUND SOURCE HEAT PUMP (GSHP).....	33
2.2.3- SISTEMAS GSHP ACOPLADOS A ESTACAS DE FUNDAÇÃO.....	37
2.2.4- EFICIÊNCIA DO SISTEMA.....	38
2.3. THERMAL RESPONSE TEST (TRT)	39
2.3.1- HISTÓRICO	39
2.3.2- EQUIPAMENTO.....	41
2.3.3- MONTAGEM	43
2.3.4- PROCEDIMENTO DO ENSAIO.....	44
2.3.5- AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	48
2.3.5.1- TEOREMA DA FONTE LINEAR	50
2.3.5.2- TEOREMA DA FONTE CILÍNDRICA.....	53
2.3.5.3- INTERPRETAÇÃO POR MODELAGEM NUMÉRICA	55
2.3.5.4- ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO.....	55
2.3.6. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OBTIDOS	57
2.3.7. INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DO ENSAIO.....	58
2.3.8. PROBLEMAS OPERACIONAIS	60
2.3.9. CASOS DE TRT NA LITERATURA	60
2.3.10. INOVAÇÃO NO TRT.....	61
3- MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1-ÁREA DOS ENSAIOS	63
3.2-ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO.....	65
3.3-EXECUÇÃO DAS ESTACAS TROCADORAS DE CALOR PARA OS ENSAIOS.....	67
3.4-MONTAGEM DO EQUIPAMENTO TRT	74
3.5-REALIZAÇÃO DO ENSAIO TRT.....	86
3.6-OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	87
3.7-MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	88
3.8-PROGRAMA E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	88
3.9-MÉTODO DE INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	92
4- RESULTADOS	95

4.1-TEMPERATURA DO SOLO	95
4.2-NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO	95
4.3-ENSAIO TRT-1	96
4.4-ENSAIO TRT-2	99
4.5-ENSAIO TRT-3	101
4.6-ENSAIO TRT-4 (ENSAIO COM INFILTRAÇÃO DE ÁGUA)	104
4.7-ENSAIO TRT-5 (ESTACA DE MAIOR DIÂMETRO COM DUPLO “U” LOOP)	106
5- ANÁLISE DOS RESULTADOS	111
5.1-VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DENTRO DA ESTACA 2 E NO SOLO PRÓXIMO DURANTE E APÓS O ENSAIO TRT-5.....	111
5.2-EFEITO DA TEMPERATURA AMBIENTE NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	114
5.3-PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS ESTACAS TROCADORAS DE CALOR.....	114
5.4-EFEITO DA VAZÃO DO FLUÍDO CIRCULANTE NA ESTACA	116
5.5-EFEITO DO TEMPO DESCARTADO NO ÍNICIO DO ENSAIO TRT.....	117
5.6-COMPARAÇÃO COM ESTUDOS ANTERIORES	118
5.7-MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	119
6- CONCLUSÕES	121
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

1 INTRODUÇÃO

Ano após ano o uso de fontes de energias renováveis vem ganhando um destaque cada vez maior, tendo em vista os problemas que a sociedade hoje enfrenta por ser refém de fontes de energia não-renováveis e que agredem e prejudicam o meio ambiente e consequentemente a qualidade de vida do ser humano. Pode ser dito que é senso comum que quanto maior a gama de fontes energéticas acessíveis ao ser humano, menores serão os impactos para o mesmo caso uma dessas fontes seja prejudicada por algum motivo, ainda mais se tratando de fontes renováveis.

Mesmo vivendo em um país considerado modelo em utilização de energia limpa por possuir a energia hidroelétrica como principal componente da matriz energética, é necessário que esta seja descentralizada, buscando novas alternativas que nos permitam diminuir a dependência do país. Muito se fala nos tempos atuais de uma crise energética iminente em nosso país.

No Brasil, os principais responsáveis pelo consumo de energia elétrica no país são os setores público e comercial. Em 2010, a energia elétrica consumida nos edifícios destes dois setores em conjunto correspondia a 47,6% do total nacional (MALLMANN 2011).

Fica em destaque a energia consumida nesses edifícios por sistemas de ar condicionado. Dados da Eletrobrás de 2006 mostram que os sistemas de ar condicionado eram na época responsáveis por 47% do consumo final da energia elétrica em edificações comerciais no Brasil.

A energia geotérmica é uma fonte de energia considerada limpa e renovável, e não possui muitos estudos no Brasil. Muito disso se deve a comodidade energética do país com sua matriz hidroelétrica e ao fato de não possuir em seu território atividades e estruturas geológicas consideradas recentes, por isso sua aplicação se resume inicialmente a atividades recreativas e lazer. O Recente crescimento econômico do país aumentou significativamente o uso de fontes energéticas não renováveis, o que denuncia que há espaço para expansão das atuais fontes de energia renováveis e principalmente a implementação de fontes ainda não aproveitadas, como a energia geotérmica (ARBOIT et al 2013).

Alguns estudos avaliam a viabilidade de aplicação do uso de energia geotérmica no país. Arboit et al (2013) lista uma série de estudos que avaliam o uso de energia geotérmica tanto para aplicação direta como para uso no mercado do turismo e lazer (águas termais), sendo que muitos apresentam resultados promissores quanto a aplicação destas tecnologias no Brasil.

Quanto as tendências da utilização da energia geotérmica, Arboit et al (2013) cita o uso de bombas de calor acopladas ao solo para a climatização de residências e edifícios, sistema conhecido como Ground – Source – Heat – Pump (GSHP). A viabilidade da aplicação de tal sistema no Brasil se deve exatamente ao fato de grande parte do território ser geologicamente antigo e por isso considerado fonte de energia geotérmica de baixa temperatura ou de baixa entalpia.

Tal sistema consiste basicamente na instalação de tubos no subsolo, por onde circula um fluido (geralmente água) responsável por fazer uma troca térmica entre a superfície e o subsolo. Este circuito de tubos é fechado e o sistema pode tanto ser utilizado para aquecer ou resfriar a superfície, uma vez que a temperatura no subsolo é constante no subsolo durante o ano, algo próximo a média anual do ambiente, conforme a Figura 1.

Figura 1. Comportamento da temperatura conforme a profundidade do subsolo.
(BRANDL 2006).

O uso deste sistema se torna economicamente mais atraente quando se fala em sua instalação em conjunto com as fundações do edifício (no caso de fundações de grande profundidade), utilização que já é realidade em diversos países da Europa e representa uma real economia nas escavações para implementação do sistema (Figura 2).

Figura 2. Sistema composto por estacas trocadoras de calor para a climatização de ambientes (KATZENBACH et al 2011).

Brandl (2006) diz que os sistemas GSHP construídos em conjunto com as fundações dos edifícios começaram a ser aplicados na década de 80, principalmente na Áustria e na Suíça, e que a elevada capacidade térmica do concreto colabora com o funcionamento do sistema. Na Figura 3 vemos a crescente aplicação deste tipo de sistema na Áustria.

Figura 3. Gráfico mostrando o acentuado crescimento do uso de estacas trocadoras de calor na Áustria (BRANDL 2006).

Porém por se tratar de uma tecnologia ainda incipiente no Brasil, ainda é preciso de muito estudo e muita tecnologia ainda deve ser desenvolvida para sua aplicação, e a primeira etapa é entender o comportamento do solo frente a um sistema destes.

O principal ensaio *in situ* realizado hoje em dia para a obtenção dos parâmetros térmicos do solo necessários para se projetar um sistema de climatização GSHP é o Thermal Response Test (TRT), que teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1980 e vem sendo aprimorado até os dias de hoje.

Esta pesquisa está centrada na realização dos primeiros ensaios do tipo Thermal Response Test (Teste de resposta térmica, traduzindo não – oficialmente) em solo tropical não saturado no Brasil, objetivando sua aplicação voltada para projetos de furos e estacas trocadores de calor. Pelo que foi pesquisado nas publicações nacionais e internacionais espera-se que este seja uma das primeiras (senão a primeira) realizações deste ensaio em território Brasileiro, ou pelo menos a primeira publicação que possui dados da realização de um.

O Thermal Response Test (Que na literatura costuma ser representado pela sigla T.R.T.) se trata de um ensaio *in situ* realizado para a obtenção de parâmetros

térmicos do solo que são utilizados diretamente na realização de projetos de estacas trocadoras de calor. O ensaio pode inclusive ser feito na própria estaca, fornecendo os valores de calor por metro que é transferido no sistema.

O ensaio já possui um histórico de aplicações em diversos países para o dimensionamento de furos trocadores de calor que constituem sistemas de climatização geotérmicos, possuindo até norma de realização. Porém esta tecnologia é muito pouco estudada no Brasil e por isso o ensaio não tem aplicações realizadas neste solo, que possui características muito peculiares, por ser não saturado e laterítico, e ainda durante a realização deste trabalho foi concluída que esta é a aplicação de um T.R.T. em um dos solos de temperatura mais elevada que se for registrada (Aproximadamente 24°C).

Porém com a pesquisa crescente sobre estacas trocadoras de calor em diversos países, o uso de climatização geotérmica vem se tornando mais econômico e conseqüentemente mais atrativo, abrindo portas para sua realização em solos não saturados como é o caso de muitos solos brasileiros.

A realização do Thermal Response Test no campo experimental da Escola de Engenharia de São Carlos é o primeiro passo para avaliar a viabilidade de aplicação desta tecnologia em território nacional, permitindo obter uma previsão do comportamento em lugares com características semelhantes, além de entender o funcionamento do ensaio, como interpretar os resultados obtidos para que os parâmetros desejados estejam corretos. Este trabalho parte desde o desenvolvimento do equipamento para a realização do T.R.T. com os materiais disponíveis e adaptações necessárias para o sucesso do ensaio até a interpretação dos resultados e comparação com outros ensaios realizados em outros locais do mundo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O Objetivo Geral dessa dissertação é realizar ensaios do tipo TRT (*Thermal Response Test*), para através destes obter parâmetros necessários para avaliação

da resposta térmica de uma estaca trocadora de calor no solo do campo experimental da EESC/USP em São Carlos, que é comum em outros lugares do Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Desenvolver e montar um equipamento capaz de realizar um ensaio do tipo TRT utilizando os recursos disponíveis no Brasil, fazendo as devidas adaptações, porém sempre seguindo o Eurocode e as principais fontes da literatura como guia, para que os resultados fornecidos pelo equipamento sejam satisfatórios.

- Determinar, através dos resultados obtidos pelo Thermal Reponse Test, os parâmetros de condutividade térmica e taxa de troca de calor do subsolo do campo experimental, considerando as diferentes condições que o solo pode apresentar.

- Avaliar o efeito do diâmetro da estaca no ensaio, através de ensaios feitos em duas estacas com diâmetros diferentes (uma de 0,25 m de diâmetro e outra de 0,5 m de diâmetro, ambas preenchidas com o mesmo material e escavadas da mesma forma).

- Avaliar o efeito da saturação do solo nos parâmetros do ensaio, através da realização de ensaios em condições normais e de um ensaio saturando-se o furo artificialmente através de um anel de saturação.

- Avaliar o efeito da variação da vazão de circulação da água responsável pela troca térmica do subsolo, avaliando qual caso apresenta uma utilização mais eficiente combinando uma maior troca térmica com um baixo consumo de energia.

- Observar o efeito da injeção de calor na estaca e no solo em seu entorno, observando qual a dimensão da alteração da temperatura na estrutura e no seu entorno, dado importante para o projeto de estacas trocadoras de calor, além de permitir uma avaliação do impacto ambiental desta tecnologia.

- Análogo ao anterior, observar o tempo de resfriamento da estaca e do solo no seu entorno, para observar quanto tempo o solo demorar a retornar ao seu estado normal após sofrer alterações forçadas por injeções de calor.

- Reunir todos os resultados dos ensaios feitos no campo para uma análise comparativa entre eles.

- Com posse dos dados, fazer uma análise comparativa dos resultados com outros ensaios realizados ao redor do mundo, colocando o Brasil no mapa dos países com avaliação dos parâmetros térmicos do solo.

2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Energia Geotérmica

De acordo com Dickinson (2004), energia geotérmica é definida como a energia contida no interior da terra que gera fenômenos geológicos em escala planetária, sendo também utilizada para indicar a parte da energia térmica disponível no interior do planeta que pode ser retirada e explorada pelo homem. Acredita-se que a fonte fundamental seja por decaimento radioativo no interior do planeta.

Esta energia flui pelo planeta e se apresenta na superfície mais concentrada em determinadas regiões devido aos movimentos das placas tectônicas. A energia geotérmica é normalmente classificada como renovável e sustentável (VILELA 2004).

As aplicações da energia geotérmica variam com as condições geológicas e climáticas de cada local. As principais características são (BATCHELOR 2005):

- Fornecimento de base extensa de recursos energéticos, disponível em todos os países.
- É uma fonte de contínua energia, podendo fornecer sob adequadas circunstâncias, eletricidade de base e sistemas de resfriamento e aquecimento.
- Ela pode alavancar o papel de outras de outras formas de energia renovável e livre de carbono.
- É economicamente competitiva em relação às fontes de energia tradicionais e suas aplicações podem ser combinadas a condições geológicas.

Segundo a ASHRAE (2011), a classificação mais comum das fontes de recursos geotérmicos é a seguinte:

- Recursos de alta temperatura ($T > 150^{\circ}$)
- Recursos de temperatura intermediária ($90^{\circ} < T < 150^{\circ}$)
- Recursos de baixa temperatura ($< 90^{\circ}$)

Geralmente, aplicações com o objetivo de gerar energia elétrica somente são economicamente viáveis no caso de altas temperaturas, porém os recursos mais comuns são os de baixas temperaturas.

Em pequenas profundidades (algumas dezenas de metros) a temperatura do subsolo sofre influência do clima da região, funcionando basicamente como um grande painel de inércia térmica, recebendo e transmitindo calor por convecção, radiação e condução. É consenso na literatura que a partir de determinadas profundidades a temperatura no subsolo é praticamente constante durante o ano. Vilela (2004) diz que aqui no Brasil a temperatura do subsolo é constante a partir de 5 aos 6 metros de profundidade.

Esta energia térmica é chamada de energia geotérmica de fonte solar ou energia geotérmica de baixa densidade energética (VILELA 2004), ou ainda energia geotérmica de baixa entalpia (ARBOIT et al 2013). Estas propriedades térmicas foram observadas na prática. Em Ottawa, no Canadá, WILLIAMS & GOLD (apud VILELA 2004) verificaram a variação de temperatura no decorrer do ano e obtiveram os resultados apresentados na Figura 4. Wang et al. (2013) mostra experiência semelhante realizada em Clayton, na Austrália (Figura 5), e pelo que podemos observar os resultados se assemelham com casos apresentados na literatura.

Popiel et al. (2001) e Wang & Qi (2008) definem a distribuição de temperaturas no subsolo em três diferentes zonas:

- Zona superficial: Sofrem grandes alterações de temperatura, sensíveis às mudanças no clima ambiente. Se estende por aproximadamente 3 à 5 metros de profundidade.

- Zona de baixa profundidade: Menos sensível que a zona superficial, mas ainda sofre influência das variações climáticas anuais. Sua extensão depende muito dos tipos de solo locais e do nível d'água, estando presente na faixa entre 1 à 20 metros de profundidade.

- Zona profunda: Apresenta temperaturas estáveis durante todo o ano, e se apresenta abaixo da cota de 8 à 20 metros geralmente, dependendo das condições do subsolo local

Figura 4. Amplitude das temperaturas em Ottawa observadas durante um ano. (Vilela 2004).

Figura 5. Temperaturas no subsolo de Clayton durante 8 meses. (Wang et al. 2013).

As diferentes formas de se aproveitar a energia geotérmica creditam a ela um grande potencial de crescimento, o que contribuiria substancialmente para a redução de emissão de gases estufa, particularmente em países em desenvolvimento (BATCHELOR 2005).

2.2 – Bombas de Calor Geotérmicas

2.2.1 – Bombas de calor

Bombas de Calor são dispositivos que têm como principal função transferir energia térmica de um ambiente para o outro. É importante ressaltar que a bomba de calor não gera quantidades significativas de energia térmica, mas sim a transfere de uma fonte para um lugar.

De uma forma geral, a maioria dos componentes de refrigeração presentes no nosso cotidiano são formas de bombas de calor. Geladeiras e Freezers possuem um sistema que remove o calor de seu interior para o exterior de suas estruturas térmicas, e principalmente o Ar Condicionado, que retira o calor do interior de um cômodo e/ou de um edifício e direciona para o exterior.

Esse tipo de sistema funciona transformando trabalho em energia térmica (Teoria do ciclo de Carnot). O sistema é composto de um circuito fechado por onde circula um fluido responsável pelas trocas térmicas, e nesse circuito há um compressor e uma válvula de expansão. O fluido circulante se encontra no estado líquido logo antes de passar pelo compressor, quando ele é comprimido até atingir o estado gasoso e conseqüentemente ter a sua temperatura elevada (etapa do processo onde é necessário introduzir energia elétrica externa, para o funcionamento do compressor). Então, o gás atravessa o circuito perdendo seu calor para fora do sistema, até atravessar pela válvula de expansão, onde a temperatura no fluido cai bruscamente e ele volta para o estado líquido, e atravessa o trecho final do circuito, agora adquirindo energia térmica de fora do sistema, até passar pelo compressor novamente (Figura 5).

No caso da Figura 6, podemos dizer que a bomba de calor está transferindo energia térmica do lado direito para o lado esquerdo. No caso de um ar condicionado, o lado esquerdo seria a parte do sistema que fica voltada para o interior do cômodo, enquanto o lado direito ficaria para fora do edifício. Existem muitas bombas de calor que possuem o recurso de reverter o fluxo do seu fluido interno, invertendo a ordem do seu funcionamento. Estas bombas são as que possuem maior aplicação na tecnologia de bombas de calor acopladas ao solo, devido a sua compatibilidade com a aplicação sazonal, que será explicada mais a frente.

Figura 6. Esquema de funcionamento da bomba de calor. (Adaptado Brandl 2006).

Porém é de conhecimento comum que o uso desse sistema de transferência de energia térmica para climatização de ambientes consome uma quantidade considerável de energia elétrica. Dados da Eletrobrás de 2006 mostram que já naquela época sistemas de Ar Condicionado eram responsáveis por 47% da energia elétrica consumida em edifícios comerciais.

É na tentativa de redução do consumo de energia elétrica usada na climatização que entram em operação os sistemas de Bombas de Calor Acopladas ao Solo (Traduzido de Ground Source Heat Pump, mais conhecido pela sigla GSHP) ou Bombas de Calor Geotérmicas (Traduzido de Geothermal Heat Pump, ou GHP).

2.2.2 – Sistemas Ground Source Heat Pump (GSHP)

Segundo a ASHRAE (2011), fontes de energia geotérmica de baixa temperatura são ideais para a aplicação de sistemas de climatização com bombas de calor acopladas ao solo, e de acordo com Arboit (2013), o Brasil possui em sua maioria regiões de energia geotérmica de baixa entalpia.

Bombas de calor geotérmicas não são exatamente uma tecnologia moderna. Patentes desta tecnologia datam de 1912 e há prédios com esse tipo de sistema em funcionamento desde 1930 nos Estados Unidos (VILELA 2004).

O Sistema consiste em utilizar a energia térmica contida no subsolo para otimizar o funcionamento da bomba de calor, seja sua função resfriar ou aquecer o ambiente (o que muitas vezes depende da época do ano). Existem inúmeras formas de utilizar desta fonte energética contida no subsolo, muitas vezes realizando uma manutenção sazonal da mesma.

Figura 7. Esquema de funcionamento sazonal de GSHP fechado. (KATZENBACH et al. 2012).

A principal forma de extração destas fontes energéticas é através dos chamados sistemas fechados. Formado por um conjunto de tubos consistindo de um circuito fechado (daí o nome) distribuídos no subsolo, por onde se deve circular um fluido (em geral água) com o objetivo de realizar trocas térmicas com o subsolo e assim otimizar o funcionamento da bomba de calor. Este circuito de tubulação é chamado de circuito primário, o circuito secundário também é fechado mas é distribuído na estrutura do edifício e tem como objetivo climatizar o ambiente da maneira desejada. O Fluxo de temperaturas vai depender das necessidades do

edifício, o que depende muito da estação do ano e do clima da região (BRANDL 2006).

O uso do circuito secundário não é obrigatório, mas muito comum nas aplicações atualmente existentes deste tipo de sistema.

Esta dependência das necessidades do edifício faz com que se tenha demandas diferentes durante o ano. Nos meses mais quentes predomina a necessidade de resfriar o ambiente, enquanto nos meses mais frio acontece o contrário. Esta modalidade de operação do sistema GSHP fechado é chamada de sazonal Figura 7.

Dentro da categoria de sistemas de climatização fechado, existem diferentes classificações dependendo de como as tubulações são distribuídas no subsolo. Os tubos podem ser distribuídos verticalmente e horizontalmente no subsolo ou ainda em lagos, conforme o exemplo mostrado na Figura 8.

Figura 8. Configurações de tubulações subterrâneas horizontais, verticais e em lagos. (VILELA 2004).

No caso das estacas trocadoras de calor, o sistema equivalente é o vertical, que apresenta a vantagem de requerer um comprimento total de tubulação menos que os outros sistemas fechados.

Outra opção são os sistemas abertos (Figura 9). O princípio de funcionamento é o mesmo, mas desta vez os tubos subterrâneos não formam um circuito fechado, e a água é extraída do subsolo e depois descartada em algum outro ponto. Este tipo de sistema exige um grande planejamento do ponto de vista ambiental para implementação (VILELA 2004).

Figura 9. Sistemas de tubulação aberta. A- Fonte no subsolo e descarte em lago. B- Fonte e descarte no mesmo lençol do subsolo. (VILELA 2004).

Por último ainda existem os sistemas diretos, que consistem na não utilização de um circuito de água como intermediário e sim implementar parte da bomba de calor no subsolo. É um sistema mais eficiente, mas com o custo extremamente mais caro, pois os tubos para conduzir gases CFC são mais complexos, além dos perigos ambientais envolvidos (VILELA 2004).

O uso deste tipo de sistema (principalmente os sistemas fechados) possuem uma popularidade elevada, principalmente pelo grande número de vantagens que oferece. Laloui et al. (2006) resume as vantagens do ponto de vista energético em três pontos:

- Até 50% de redução de emissões de carbono em novos edifícios.
- Redução no uso de energia primária e aumento no uso de energia renovável pelo armazenamento de calor no solo como tecnologia inovadora.
- Redução da necessidade de transporte de energia, e dentro disso todos os gastos e riscos de acidentes que o envolvem.

Gehlin (2002) diz que por volta de 20000 furos são escavados a cada ano na Suécia destinados à aplicação de energia geotérmica, sendo a maioria em casas

simples. E na Noruega 30 grandes projetos de sistemas GSHP foram iniciados entre os anos de 1998 e 2002. O maior mercado se concentra na América do Norte, onde mais de meio milhão de furos são escavados por ano.

He & Lam (2006) cita que as bombas de calor geotérmicas são a tecnologia ligada a energias renováveis cuja aplicação mais cresce em todo o mundo. Com incrementos de aproximadamente 10% em cerca de 30 países no decorrer de 10 anos (1995 – 2005), sendo a maioria nos estados unidos e países do norte europeu, porém em regiões de clima tropical e subtropical (onde a demanda pelo resfriamento é maior) existem poucos projetos e pesquisas no meio.

2.2.3 – Sistemas GSHP acoplados a estacas de fundação

Com o principal objetivo de fazer economia na escavação e instalação dos tubos trocadores de calor, os tubos do circuito primário começaram a ser instalados em conjunto com os elementos de fundação dos edifícios (Figura 10) onde funcionariam os sistemas GSHP verticais (Quando as fundações a serem executadas são do tipo profundas, como estacas). Tal solução teve início na Áustria na década de 80 e praticamente elimina os custos com escavação (BRANDL 2006).

Figura 10. À esquerda, tubos de PEAD acoplados na armadura da estaca. À direita, instalação da mesma armadura. (KATZENBACH et al. 2011).

Além disso, He & Lam (2006) citam outras vantagens da combinação da tubulação com os elementos de fundação:

- O concreto tem propriedades térmicas melhores que a areia e o graute que geralmente são utilizados para preencher os furos trocadores de calor, além de possuírem uma capacidade térmica maior que o sistema convencional.

- O uso do sistema acoplado as fundações dispensa o uso de área em terreno para instalar os furos trocadores de calor, além de também dispensar as escavações uma vez que as fundações serão feitas de qualquer jeito. Isto gera uma economia significativa, principalmente em locais com alta densidade populacional.

Para a instalação do sistema em conjunto com as estacas, os tubos responsáveis pela circulação do fluido são presos nas armaduras das estacas antes da sua instalação, e posteriormente a estaca é executada da mesma forma (Figura 9).

De acordo com Laloui et al. (2006), em 2006 eram são mais de trezentas instalações por toda a Europa que já contam com esta tecnologia em funcionamento.

2.2.4 – Eficiência do sistema

Logicamente, o uso deste tipo de sistema depende de uma avaliação da sua eficiência, uma vez que as condições para sua aplicação variam de acordo com o local.

Para Brandl (2006), considera-se o sistema eficiente quando, contabilizando toda a energia térmica movimentada para climatização de um edifício, apenas 25% dela tem origem na fonte elétrica, e os outros 75% na fonte geotérmica de baixa profundidade. Observando a implicação da utilização deste sistema nos custos, destaca-se que se economiza até 2/3 do valor da conta de luz referente a parte de climatização.

Por isso é importante avaliar o comportamento de tal sistema no local onde se deseja instalá-lo. São muitos os fatores que influenciam diretamente a transferência de calor, como o clima do local, a incidência de chuvas, geologia local e principalmente as necessidades do projeto (ECES 2013).

Para avaliar o comportamento de todos estes componentes juntos in situ, a ferramenta mais utilizada atualmente é o Thermal Response Test.

2.3 – Thermal Response Test (TRT)

2.3.1 – Histórico

Com a popularização do uso de sistemas de climatização geotérmicos em diversos países, projetos cada vez maiores e mais ousados começaram a ser realizados, aumentando a necessidade de estudos do comportamento dos sistemas previamente a sua execução (ECES 2013).

Existem formas de se estimarem as propriedades térmicas do solo a partir do que é conhecido na literatura, identificando o tipo de solo presente no local e analisando por tabelas como a Tabela 1. Como a geologia não é algo uniforme e varia de local para a local, conseqüentemente os parâmetros térmicos também sofrem variações, e avaliações in situ se fizeram necessárias para que os projetos fossem realizados de forma mais confiável. Inicialmente tais análises eram feitas com amostras retiradas do campo e analisadas em laboratório, a partir do teste da sonda-agulha, que consiste em inserir uma sonda muito pequena em uma amostra de solo corretamente armazenada e observar sua alteração de temperatura com o tempo (LHENDUP et al 2014), mas os elevados custos, principalmente relativos a escavações, e a grande quantidade de amostras a serem analisadas nos grandes projetos tornavam muitas vezes a obtenção das propriedades térmicas inviáveis economicamente (ECES 2013).

Tabela 1. Propriedades térmicas de alguns tipos de solo obtidas na literatura (LHENDUP 2014).

Material	Condutividade Térmica (W/mK)	Capacidade calorífica volumétrica (kJ/m³K)
Pedregulho	2,0 – 3,3	2200 – 2700
Areia	1,5 – 2,5	2500 – 3000
Silte	1,4 – 2,0	2500 – 3100
Argila	0,9 – 1,8	2200 – 3200
Argilito	2,6 – 3,1	2340 – 2350
Arenito	3,1 – 4,3	2190 – 2200

O Thermal Response Test (T.R.T.) surgiu como uma alternativa economicamente viável, pois podia ser realizado em um dos furos que já seriam utilizados no sistema de climatização geotérmico. Depois das primeiras publicações com resultados consistentes o ensaio se popularizou rapidamente. O primeiro artigo sugerindo um equipamento de T.R.T. móvel foi apresentado por Morgesen em uma conferência “Stock” em Estocolmo em 1983, mas só no meio da década de 90 o equipamento para ensaios práticos foi desenvolvido com sucesso e hoje mais de 20 países possuem aplicações do ensaio e desde a “Terrastock Conference” de 2000 em Stuttgart, o T.R.T. tem uma seção exclusiva de publicações (ECES 2013).

Estudos comparativos entre a determinação da condutividade térmica por tabelas, por ensaios de sonda térmica e por Thermal Response Tests, mostram que na enorme maioria dos casos os valores de condutividade térmica determinados por tabela tendem a ser os menores, enquanto os ensaios T.R.T. (que apresentam o comportamento real do solo in situ) apresentam valores consideravelmente maiores (LHENDUP et al 2014).

Um dos primeiros aparatos móveis para a realização do T.R.T. foi desenvolvido na Suécia na universidade de Luleå, introduzido em 1995 por Signhild Gehlin (GEHLIN 2002), e outro por Austin (1996) na universidade do estado de Oklahoma nos Estados Unidos.

O T.R.T. é um ensaio in situ que fornece as propriedades relativas a transferência de calor do subsolo no local e profundidade desejados. É um ensaio necessário para o projeto de qualquer sistema que envolva o uso de troca de calor com o subsolo, como é o caso dos projetos de climatização geotérmica sejam eles acoplados a estacas de fundação ou não. O Ensaio fornece os parâmetros de condutividade térmica e resistência térmica (ECES 2013).

O teste consiste em injetar (ou retirar) calor do solo à uma taxa constante através de um furo previamente realizado. São coletados os dados de temperatura de entrada e saída e o teste é interpretado com fundamentos teóricos, obtendo os parâmetros desejados. O ensaio possui procedimento registrado com uma norma própria no Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011), porém existem muitas particularidades que variam de acordo com a literatura disponível. Para descrever o ensaio por completo, iremos tratá-lo por partes.

2.3.2 – Equipamento

Em um furo previamente realizado com a profundidade desejada para determinação dos parâmetros de transferência térmica, um tubo em “U” é inserido no subsolo, por onde irá circular o fluido responsável por realizar a troca térmica, inserindo ou retirando o calor. Acima vai o equipamento responsável por realizar o ensaio, que consiste de um aquecedor (responsável por fornecer a energia térmica que será inserida no furo), uma bomba d’água ou equivalente (responsável pela circulação do fluido), sensores de temperatura na entrada e na saída do tubo, e também um monitoramento da temperatura ambiente (que forneceram as temperaturas necessárias para a determinação dos parâmetros), um medidor de vazão na tubulação e um sistema de aquisição de dados. Alguns projetos incluem um controle maior das temperaturas (Figura 11 e Figura 12).

Figura 11. Representação esquemática de elaboração do ensaio T.R.T (GEHLIN 2002).

Figura 12. Exemplo de projeto de um equipamento de T.R.T. (ECES 2013).

Segundo a (CEN/TC 341 N525 2011), o furo deve ser preenchido com um material que garanta o transporte térmico entre o solo e o tubo, sendo durável e física e quimicamente estável. Ainda o fluido circulante deve ser água por apresentar boas propriedades hidrodinâmicas e não oferecer riscos ao meio ambiente. O uso de aditivos anti – congelantes deve ser justificado, mas provavelmente não serão necessários em nenhuma aplicação no Brasil.

O equipamento é muitas vezes montado de forma que possa ser movimentado facilmente, dentro de containers ou em carretas para facilitar o transporte (Figura 13). É importante também que exista uma fonte de energia elétrica estável para ligar o equipamento, uma vez que o ensaio é longo e é muito importante que o calor seja fornecido constantemente durante todo o período.

Figura 13. Equipamento de ensaio TRT montado na Suécia (GEHLIN 2002).

2.3.3 – Montagem

O ensaio possui algumas particularidades quanto ao procedimento que se diferenciam de acordo com o que está disponível na literatura publicada, sendo que o ensaio possui um procedimento determinado pelo Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011) e mesmo assim alguns artigos discordam, mas o princípio é sempre o mesmo.

Para a abertura do furo, deve se utilizar um equipamento capaz de executá-lo, o que dependerá da geologia do local. Conhecer previamente a geologia do local também é importante, principalmente para determinar a condutividade térmica esperada do furo, fator que influencia algumas determinações do ensaio. O tubo precisa de uma boa resistência e costuma ser de material maleável, recomenda-se o uso de PEAD (Polietileno de alta densidade). Além disso, o furo deve ser preenchido com materiais com boas propriedades térmicas, são recomendados graute, areia e/ou água com lama bentonítica (CEN/TC 341 N525 2011; ECES 2013).

A instalação dos tubos deve ser cautelosa. Devem ser utilizados espaçadores para evitar atalhos térmicos em possíveis contatos entre os tubos. Os tubos não devem ser forçados contra o fundo do furo. O furo deve ser preenchido com cuidado de forma que não se danifiquem, com material menos permeável que o solo em seu entorno. É recomendado manter os tubos preenchidos e pressurizados durante a concretagem para evitar possíveis danos ou estrangulamentos. É importante registrar as informações do furo durante sua execução para evitar dúvidas.

Depois de concluída a instalação, o equipamento deve passar por um teste de funcionamento, que consiste em uma avaliação de vazão e de pressão, para verificar se o furo foi corretamente executado e preenchido, e os tubos não sofreram danos que impeçam a realização do ensaio.

É muito importante manter o equipamento de ensaio bem isolado de influências externas, como as alterações climáticas e variações no fornecimento de energia, e no caso de furos mal grauteados, da água da chuva. Porém testes longos permitem ajustes estatísticos para a correção da influência destes fatores (SANNER et al. 2005). Para atingir um nível de precisão e acurácia satisfatórios no resultado do teste, é importante escolher a instrumentação correta, além de uma boa calibração. ECES 2013 determina que os sensores de temperatura mais recomendados são as termoresistências do tipo Pt 100, enquanto os medidores de vazão devem ser do tipo magnético ou ultrassônico, porém são admitidos também sensores de temperatura do tipo termopar e medidores de vazão do tipo turbina. A precisão das medidas de temperatura deve estar entre $\pm 0.01\text{K}$ a $\pm 0.05\text{K}$, valores que são equivalentes as medições dos sensores Pt 100. Quanto aos sensores de vazão, a precisão dos sensores magnéticos e ultrassônicos fica entre 0.1% a 0.5%, porém a vazão deve se manter elevada para uma maior precisão, já no sensor do tipo turbina o erro é razoavelmente maior, porém ainda aceitável.

A instalação dos sensores também deve ser cautelosa. O medidor de vazão costuma possuir instruções de instalação, como distância mínima de outros componentes para evitar perturbações na leitura. Zervantonakis & Reuss (2006) recomendam que os sensores de temperatura sejam instalados diretamente no tubo em contato com o fluido, evitando coberturas ou contato direto com a parede do tubo para amenizar a influência externa.

2.3.4 – Procedimento do Ensaio

Para cada ensaio, o equipamento deve ser verificado se é adequado. A bomba de circulação deve ser capaz de produzir um escoamento turbulento no furo a ser ensaiado e o aquecedor deve fornecer uma taxa de calor suficiente segundo o determinado na CEN/TC 341 N525 (2011), sendo que solos com menores condutividades térmica requerem uma menor potência calorífica.

O teste não deve ser iniciado num prazo inferior a 5 dias após a finalização da execução e preenchimento do furo para solos onde se espera uma baixa condutividade térmica, e 3 dias para solos onde se espera uma condutividade térmica elevada. Se possível, é recomendado o acompanhamento da temperatura do furo e aguardar sua estabilização (CEN/TC 341 N525 2011). Também não devem ser feitas escavações em um raio de dez metros do furo até 5 dias antes do ensaio.

Primeiramente deve-se determinar a temperatura do subsolo não perturbado. Este é um dado importante para a interpretação do ensaio após sua conclusão. Isto pode ser feito medindo a temperatura do fluido antes do equipamento de aquecimento ser ligado, somente a bomba de circulação.

Eskilson (1987) mostrou que não é necessário considerar a variação da temperatura ao longo do furo para aplicações de armazenamento de energia geotérmica. A temperatura média ao longo do furo pode ser utilizada como a temperatura do solo não perturbado ao redor do furo.

É importante garantir a mistura de todo o fluido circulante (escoamento turbulento) e as medições devem seguir um intervalo de 10 segundos. A média dos valores medidos em todo o período de circulação é o valor da temperatura não perturbada do subsolo (ECES, 2013). As variações são grandes no início da medição mas tendem a estabilizar (Figura 14). Também deve ser determinada a quantidade de calor que é fornecida ao solo.

Figura 14. Medição da temperatura não perturbada do subsolo através da circulação de água (ECES 2013).

Determinados estes parâmetros, o teste deve ser iniciado ligando o aquecedor. O teste deve ser executado por um período ininterrupto com aplicação de carga térmica constante. De acordo com CEN/TC 341 N525 (2011), o tempo mínimo de execução do ensaio é de 48 horas, e ainda este tempo pode ser diferente dependendo:

- Dimensões e projeto do furo trocador de calor
- O valor e a constância da capacidade térmica

O tempo mínimo de ensaio pode ser calculado pela equação:

$$t_1 = \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (1)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{\lambda_{est}}{\rho c_p} \quad (2)$$

r_0 = Raio do furo (m)

λ_{est} = Condutividade térmica estimada (W/m/K)

ρc_p = Capacidade térmica volumétrica (J/m³/K)

Porém, outros tempos de duração do ensaio são apresentados a literatura. AUSTIN (1995) determina que a duração do teste é de no mínimo 50 horas, incluindo o período de descarte das temperaturas. GHELIN (1998) é ainda mais exigente determinando que o tempo de ensaio deve ser de pelo menos 60 horas, enquanto SMITH & PERRY (1995) dizem que entre 12 e 20 horas de medição são suficientes.

É importante também saber que as primeiras leituras de temperatura do ensaio devem ser descartadas, uma vez que elas sobem rapidamente no início do teste, já que a transferência de calor neste período é dominada pelo efeito transiente. Porém, este período de descarte varia de acordo com os autores, e influencia diretamente nos resultados. (AUSTIN 1995) recomenda que sejam

descartadas as primeiras 12 horas, enquanto (GEHLIN 2002) recomenda entre 12 e 20 horas. Para uma demonstração mais prática, (LHENDUP 2014) avaliou os valores de condutividade térmica obtidos de acordo com o tempo de ensaio executado, para encontrar até quanto tempo de ensaio os valores ainda apresentariam grandes variações. Observando os resultados dos quatro ensaios realizados apresentados na Figura 15, foi concluído que as primeiras 20 horas do ensaio seriam descartadas para análise.

Já, quanto a duração do teste, (LHENDUP 2014) avaliou qual a duração em que as mudanças de condutividade e resistividade térmicas do furo (Figura 15 e Figura 16) não sofriam alteração significativa. E a partir dos resultados apresentados na Figura 15 e na Figura 16, chegou-se a duração de 70 horas.

Figura 15. Condutividades térmicas obtidas em 4 ensaios T.R.T. de acordo com o tempo de execução (LHENDUP 2014).

Figura 16. Resistências térmicas obtidas nos TRTs de acordo com o tempo de execução em cada um (LHENDUP 2014).

Caso um teste seja descartado, um novo teste não pode ser repetido dentro de 10 dias após a conclusão do primeiro teste em formações de elevada condutividade térmica e 14 dias em formações de baixa condutividade térmica. A temperatura do furo deve estar próxima o suficiente a temperatura do furo sem perturbações determinada antes do primeiro ensaio.

É importante manter a taxa de calor depositada no fluído constante e não realizar o ensaio quando o solo ainda estiver perturbado, LHENDUP 2014 encontrou variações em seus resultados as quais creditou a esses dois fatores.

O teste oferece como resultados (medidos pelo sistema de aquisição):

- Temperatura do fluído circulante logo antes de entrar no furo
- Temperatura do fluído circulante logo após sair do furo
- A energia térmica depositada no ensaio
- A energia elétrica utilizada
- A vazão
- As condições ambientes

2.3.5 – Avaliação dos resultados

De acordo com o Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011), existem duas ferramentas que permitem obter os parâmetros do ensaio a partir dos resultados obtidos:

- Determinação por aproximação simplificada pela teoria da fonte linear
- Estimativa de parâmetros por solução numérica

De acordo com (GEHLIN 2002) a aplicação do teorema da fonte linear é muito popular na Europa, enquanto nos Estados Unidos predomina o teorema da fonte cilíndrica, mas vários pesquisadores (BRANDL 2006; ECES 2013) concordam que a ferramenta mais prática é a solução simplificada do teorema da fonte linear.

A aplicação da teoria da fonte linear só pode ser utilizada se o gráfico de temperatura X tempo, com o eixo do tempo em escala logarítmica, puder ser

aproximado a uma reta, descartando o período inicial de equilíbrio, pois seu coeficiente angular é usado no cálculo.

Determinada a condutividade térmica, se recomenda que seja feito o cálculo do tempo de ensaio, caso os valores da condutividade térmica efetiva e estimada sejam muito diferentes.

A solução por simulação numérica é utilizada estimando-se os parâmetros de condutividade térmica e resistência térmica, variando-os até se obter um gráfico suficientemente próximo ao obtido com o ensaio.

Na Figura 17 temos um exemplo de um gráfico resultante de um ensaio T.R.T., apresentado como exemplo na norma (CEN/TC 341 N525 2011).

Figura 17. Resultado de um ensaio T.R.T. típico com tempo na escala logarítmica (CEN/TC 341 N525 2011).

Na Figura 16 tem – se:

- 1 Temperatura em °C
- 2 Tempo em escala logarítmica
- 3 Taxa de aquecimento em W
- 4 Temperatura na entrada
- 5 Média entre 10 e 43,3 horas
- 6 Temperatura na saída
- 7 Taxa de calor

O mesmo gráfico pode ser apresentado na Figura 18, mas com o tempo em escala normal (não logarítmica).

A seguir, tem –se uma breve análise dos diferentes métodos de avaliação do ensaio.

Figura 18. Exemplo de resultado de T.R.T. com tempo na escala normal (CEN/TC 341 N525 2011).

2.3.5.1 – Teorema da fonte linear

A interpretação do Thermal Response Test através do teorema da fonte linear de kelvin (Traduzido de Kelvin line source theory) é muito utilizada devido a sua rapidez e simplicidade (BANDOS et al 2009).

O Teorema da fonte linear é baseado em uma fonte de calor linear infinitamente longa e permanente (que seria o furo trocador de calor), como uma taxa de transferência de calor constante para um meio onde ela se encontra inserida, que atua absorvendo o calor da fonte linear (que seria o solo onde o furo está inserido), sendo que este meio se encontra inicialmente todo em uma temperatura inicial (T_0), assumindo os seguintes fatos (ELMOZUGH et al 2009):

- As propriedades do solo são consideradas homogêneas
- O fluxo de água subterrânea é desconsiderado
- Os efeitos da ponta do furo são desconsiderados

Assim a temperatura em qualquer ponto do meio é dada pela equação:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \int_{\frac{r}{2\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (3)$$

Para incluir os dados de resistência térmica do furo, Morgensen (1983) define esta resistência (m_{TR}) na unidade de (hr pés °F/Btu) e a equação final após algumas transformações fica (AUSTIN 1995):

$$\Delta T(R, t) = Qm_{TR} + \frac{Q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{R^2} \right) - C \right] + \frac{Q}{4\pi k} [\ln(t)] \quad (4)$$

Considerando que a taxa de calor inserida é constante, a única variável da equação é $\ln(t)$, se resumindo a uma simples equação linear da forma:

$$y = mx + b \quad (5)$$

Assim com os dados experimentais de ΔT e da taxa de energia térmica fica simples a plotagem do gráfico, onde com sua inclinação se encontra o valor de (m) e a condutividade térmica pode ser calculada.

A condutividade térmica efetiva é determinada pela equação:

$$\lambda_{eff} = \frac{q}{k4\pi H} \quad (6)$$

Onde:

q = Calor depositado no furo

H = Comprimento do furo trocador de calor

k = Coeficiente angular do gráfico resultante (Figura 17)

Essa equação é utilizada no cálculo do método que é chamado de teorema da fonte linear simplificado, pois parte das alegações do teorema da fonte linear de Kelvin para fornecer uma equação simplificada que fornece a condutividade térmica.

Ainda dentro do teorema da fonte linear simplificado, utiliza-se a seguinte equação para se calcular a resistência térmica do furo:

$$R_b = \frac{\Delta T_f}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_g t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (7)$$

Onde:

q = Suprimento de calor por comprimento de estaca

ΔT = diferença entre a temperatura do subsolo sem alterações e a temperatura do fluído no tempo t

λ_g = Condutividade térmica do solo

r_b = Raio do furo

α_g = difusidade térmica do solo

γ = constante de Euler (0.5772)

Estudos comparativos entre análises numéricas e análises pelo teorema da fonte linear foram feitos mostrando que o teorema só é válido para este tipo de análise sob condições específicas (BANDOS et al 2008), e ainda existem algumas dificuldades para implementá-lo na prática (AUSTIN, 1995).

Porém, o Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011) assume que o cálculo pelas equações do teorema da fonte linear simplificado fornece resultados suficientes para utilização dos dados para projetos de sistemas de climatização geotérmicos.

2.3.5.2 – Teorema da fonte Cilíndrica

O teorema da fonte cilíndrica foi primeiramente implementado por Carslaw & Jaeger (1948) e apresentado por Ingersoll (1954). O princípio é o mesmo da fonte linear, mas dessa vez a fonte de calor possui um diâmetro considerável e por isso apresenta formato cilíndrico, e está inserida num mesmo meio homogêneo a uma temperatura inicial (T_0) (AUSTIN 1995).

A solução do teorema da fonte cilíndrica se inicia com a equação:

$$\Delta T_g = T_{ff} - T_{ro} = \frac{q_{gc}}{k_s L} G(z, p) \quad (8)$$

Onde:

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)] d\beta / \beta^2 \quad (9)$$

T_{ff} – Temperatura no meio distante

T_{ro} – Temperatura na parede do cilindro

T_g – Temperatura no solo

q_{gc} – Fluxo de calor direcionado ao solo

k_s – Condutividade térmica do solo

L – Comprimento do cilindro

Esta solução parte do pressuposto que o fluxo de calor para o solo é constante. Para transformar o problema de duas fontes cilíndricas (ida e volta do tubo em “U”) em apenas uma, Bose (1984) propõe a determinação de um diâmetro equivalente:

$$D_{equivalente} = \sqrt{2} D_0 \quad (10)$$

Assim os dois tubos são representados por apenas um com o diâmetro equivalente determinado. Para determinar a resistência térmica do furo, deve-se

encontra a resistência da parede do tubo e a resistência devido a convecção do fluído em movimento dentro do tubo (AUSTIN 1998).

A resistência térmica do tubo é dada pela equação:

$$R_p = \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2k_p} \quad (11)$$

E requer a determinação da condutividade térmica do tubo (k_p). Já a resistência térmica devido a convecção é dada por:

$$R_c = \frac{1}{h_i \frac{r_i}{r_o}} \quad (12)$$

O coeficiente de convecção (h_i) é dado por uma função do número de Nusselt, determinado por Dittus (1930):

$$h_i = \frac{Nu_{D_i} k_w}{D_i} \quad (13)$$

Determinados os valores de (R_p) e (R_i) determina-se a resistência equivalente do tubo:

$$h_{eq} = \frac{1}{R_p + R_c} \quad (14)$$

A diferença de temperatura entre a parede do cilindro e o fluído circulante no centro do tubo é calculada pela equação:

$$\Delta T_p = \frac{q_{gc}}{C N_t h_{eq} A_o} \quad (15)$$

Onde (A_0) é a área da parede do cilindro em contato, ($C = 0.85$) é o coeficiente relativo a um circuito curto relativo ao uso de somente um tubo em “U” (KAVANAUGH 1984) e (N_t) é o número de tubos utilizado (AUSTIN 1995).

E assim finalmente pode-se determinar a temperatura média da água, para o cálculo da condutividade térmica:

$$T_{avg} = T_{ff} + \Delta T_g + \Delta T_p \quad (16)$$

Como visto o teorema da fonte cilíndrica é consideravelmente mais trabalhoso e não oferece resultados tão satisfatórios, por isso o teorema da fonte linear acaba sendo mais utilizado, sendo que o teorema da fonte cilíndrica é mais aplicado em soluções computacionais (AUSTIN 1998).

2.3.5.3 – Interpretação por modelagem numérica

O uso de modelagem numérica para se obter os parâmetros desejados no Thermal Response Test permite uma abordagem muito mais detalhada do problema, pois não são necessárias todas as considerações e simplificações que os métodos analíticos acima apresentados. Porém a exigência de dados da geometria do tubo, propriedades do fluido trocador de calor, tubos, solo, preenchimento, e ainda se houverem as variações de transferências de calor, podem tornar o método trabalhoso demais para sua aplicação, inviabilizando sua utilização.

Berberich et al (1994) analisou os resultados de um furo trocador de calor que possuía sensores de temperatura posicionados na parede do furo. Foram elaboradas soluções pelo teorema da fonte linear e por um modelo numérico de duas dimensões detalhado. A diferença foi de 5% a menos de condutividade térmica nos cálculos analíticos, e concluiu-se que tal diferença se deve ao fato do modelo numérico levar em consideração o furo como finito (GEHLIN & HELLSTRÖM 2003).

2.3.5.4 – Análise comparativa entre os métodos de interpretação

Gehlin (2003) fez uma análise comparativa entre os métodos que são usados para avaliar os resultados de um Thermal Response Test (Tabela 2). Os métodos avaliados foram:

- Aproximação da fonte linear
- Simplificação da aproximação da fonte linear
- Método analítico da fonte cilíndrica
- Método de diferenças finitas unidimensional (solução numérica)

Tabela 2. Dados de entrada necessários para utilizar cada uma das ferramentas de análise de um ensaio T.R.T. (GHELIN & HELLSTRÖM 2003).

Dados de Entrada	Fonte linear	Fonte linear aprox.	Fonte cilíndrica	Modelo numérico
Profundidade do furo	X	X	X	X
Diâmetro do furo	X	X	X	X
Temperatura do solo não-perturbado	X	X	X	X
Energia injetada	X	X	X	
Capacidade calorífica volumétrica do solo	X	X	X	X
Capacidade calorífica volumétrica do fluído			X	X
Capacidade calorífica volumétrica do preenchimento do furo			X	X
Diâmetro do tubo			X	X
Espessura da parede do tubo			X	X
Condutividade térmica da parede do tubo				X

Com as mesmas condições iniciais, os mesmos ensaios T.R.T. foram analisados por esses quatro métodos para permitir que uma análise comparativa dos resultados seja feita. A intenção não foi determinar o melhor método, mas sim avaliar as particularidades de cada um e observar em que caso cada um deve ser empregado. Um comparativo dos dados de entrada (exemplificando o que foi citado anteriormente sobre o uso de modelagem numérica) é apresentado na tabela.

Os dados dos 3 testes avaliados possuem uma série de características diferentes e foram obtidos da literatura, para avaliar se estas características

poderiam ter influência nos resultados. Gehlin & Hellström (2003) concluiu que o método da fonte linear foi o que mais se aproximou dos resultados reais nos três casos, porém o modelo numérico é o mais recomendado quando houverem testes com uma taxa de calor depositada variável.

2.3.6 – Avaliação dos parâmetros obtidos

Os parâmetros determinados no ensaio são utilizados principalmente em projetos de sistemas de climatização geotérmicos. Através do conhecimento de obras existentes e casos de sucesso e insucesso, é possível avaliar o potencial do local para receber sistemas desse tipo.

Olgun & McCartney (2014) apresentam uma tabela (Figura 19) onde mostram a partir da taxa de troca de calor resultante do ensaio, a qualidade do local para receber determinados tipos de obras.

O Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011) diz que os solos com uma condutividade maior que 1,7 W/mK são considerados de alta condutividade térmica, enquanto os com condutividade térmica menor que o mesmo valor são de baixa condutividade térmica. Esta característica, além de importante no projeto, tem influência direta na realização do ensaio, pois o solo de alta condutividade térmica permite que o intervalo de realização entre um ensaio TRT e outro seja menor.

Figura 19. Potencial do terreno para climatização geotérmica de acordo com o sistema geotérmico utilizado (OLGUN & MCCARTNEY, 2014).

2.3.7 – Influência dos componentes do ensaio

A montagem e realização do ensaio englobam particularidades que afetam os resultados. Cada ensaio acaba sendo uma avaliação particular daquele furo, com aquela profundidade, aquele diâmetro, naquele solo.... Concluindo, uma gama enorme de fatores influencia o resultado e é importante saber como isso ocorre.

Usando modelos numéricos, Bidarmaghz et al (2014) avaliou a influência de alguns parâmetros relativos ao furo nos resultados do TRT e consequentemente na eficiência da troca de calor. No que diz respeito a quantidade e geometria dos tubos, conclui-se que a eficiência aumenta com a quantidade de tubos porém a diferença de dois para três tubos em U é bem pequena, o que não justifica o custo adicional (considerando furos de pequeno diâmetro). A maior separação entre os tubos também aumenta a eficiência, como pode ser observado na Figura 20.

Quanto ao diâmetro do furo, Brandl (2006) diz que como um diâmetro maior fornece uma maior área de concreto para troca de calor, o potencial de troca é maior. Porém artigos mais recentes mostram que existem outras variáveis envolvidas. Loveridge & Powrie (2014) dizem que uma estaca de diâmetro muito grande demora muito mais para atingir o estado estável de temperatura, e as vezes nem o atinge, o que provoca muitas incertezas quanto ao comportamento da mesma, tanto sobre troca de calor como sobre sua performance mecânica. Luo et al (2013) comparou 3 furos de diâmetros pequenos (121, 165 e 180 mm) e confirmou que os furos de maior diâmetro possuem maior eficiência, com um aumento da mesma em 6,7% do furo menor para o maior.

Figura 20. Efeito da distância entre os tubos na eficiência da troca de calor da estaca para simples U-loop, duplo U-loop e triplo U-loop (BIDARMAGHZ et al 2014).

O nível d'água no momento do ensaio é um ponto importante a ser avaliado. Sabe-se que a água é um bom condutor de calor, principalmente quando comparado ao ar, por isso a parcela de solo abaixo do nível d'água conduz calor de forma muito mais rápida que o solo acima (considerando solos semelhantes), porém, além disso, existe o efeito do fluxo de água subterrâneo. Se houver um fluxo grande de água subterrânea, a condutividade térmica do solo fica mascarada, considerando a velocidade de Darcy (Sanner et al 2005), já que no caso de furos muito profundos, grande parte deles fica abaixo do nível d'água.

You et al (2014) avaliou o efeito da vazão da água dentro dos tubos nos resultados de taxa de troca de calor. Segundo o mesmo, se houver uma vazão baixa, mais tempo é necessário para trocar o calor, apesar do solo possuir potencial para transferência maior, porém se a vazão for muito alta, a troca de calor da água com o solo em seu entorno não é suficiente e há desperdício de energia elétrica. Assim, existe uma velocidade ótima onde a troca de calor é melhor aproveitada. Foram feitos 3 testes, com as velocidades da água nos tubos iguais a 0,26 m/s, 0,51 m/s e 1,02 m/s respectivamente. O primeiro teste forneceu uma taxa de troca de calor de 84 W/m, o segundo 116 W/m e o terceiro 94 W/m, confirmando as suspeitas quanto a existência de uma vazão ótima, que deve ter valor entre 0,5 e 0,6 m/s.

Já Bidarmaghaz et al (2014) avaliou a influência da vazão através de modelos numéricos, considerando diferentes configurações dos tubos. Apesar de não concluir nada sobre velocidade ótima como You et al (2014), ele diz que os aumentos na taxa de troca de calor na variação da vazão quando o regime já se encontra turbulento não produz grandes efeitos, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21. Efeito da variação da vazão do fluido dentro da estaca na taxa de troca de calor, avaliado por modelo numérico. (BIDARMAGHZ et al 2014).

2.3.8 – Problemas Operacionais

Alguns problemas operacionais no ensaio podem acontecer, principalmente por se tratar de um ensaio bastante longo e sem interrupções. Para o ensaio não ser facilmente descartado, é importante tomar alguns cuidados e fazer algumas considerações quanto a certas influências externas. Lembrando que um novo ensaio só pode ser feito no mesmo furo após alguns dias, como já citado.

Para evitar problemas relativos a perda ou ganho de calor no sistema devido a trocas com o ambiente, a temperatura ambiente deve ser monitorada. Caso contrário, ganhos ou perdas descontrolados de temperatura podem causar alterações nos dados obtidos experimentalmente (AUSTIN 1998).

Outro problema que deve ser evitado é a variação no fornecimento de energia elétrica. Como já foi dito é importante manter a taxa de calor inserida no sistema constante durante todo o ensaio, e eventuais picos ou quedas de energia podem influenciar diretamente nesse dado. Existem diferentes soluções para este problema, a mais simples é a utilização de estabilizadores de eletricidade (ZERVANTONAKIS 2006). Também é possível controlar diretamente a diferença de temperatura enquanto se mede a taxa de injeção de calor, que pode estar variando (WITTE 2002). Ou ainda analisar os resultados considerando a variação de energia elétrica (que então deve ser medida) utilizando simulações numéricas.

Principalmente em TRTs realizados em camadas significativas de rocha, a análise do fluxo de águas subterrâneas é um ponto importante a ser considerado. Gehlin (2002) destaca que fraturas simples ou múltiplas podem ter grandes influências em um resultado de um TRT.

2.3.9 – Casos de TRT na literatura

Como já dito, este trabalho consiste na realização do primeiro ensaio do tipo TRT no Brasil. É importante comparar os resultados com outros ensaios feitos ao redor do mundo, a fim de avaliar o futuro da realização do próprio TRT no Brasil assim como sobre o desenvolvimento da tecnologia de bombas de calor superficiais no Brasil.

Os primeiros estudos mais importantes de TRT já realizados são os trabalhos de AUSTIN (1998) e GEHLIN (1998), que desenvolveram os equipamentos realizadores desses ensaios. Porém hoje as pesquisas se espalham pelo mundo. Segundo Sanner et al (2005) existem equipamentos para realizar o ensaio no Canadá, Chile, China, Alemanha, Holanda, Noruega, Coréia do Sul, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos. Porém para a realização desse trabalho foram encontrados ainda ensaios também na Bulgária e na Austrália. Na Tabela 3 estão reunidos resultados de ensaios realizados em alguns desses lugares.

Tabela 3. Resultados de ensaios Thermal Response Test em diferentes países.

Fonte	País	Temperatura do Solo (°C)	Profundidade (m)	Diâmetro do furo (m)	Condutividade Térmica (W/mK)
Gehlin & Nordell (1998)	Suécia	8 - 10,5	115 - 197	0,1 - 0,16	3,2 - 5,5
Georgiev et al (2010)	Bulgária	-	42	0,18	0,86
You et al (2014)	China	~ 16	18	0,42	2,38 - 2,78
Banks et al (2013)	Reino Unido	~ 12,4	~ 93	~ 0,143	~ 2,99
Loveridge et al (2014)	Inglaterra	17,7	26	0,3	2,4 - 2,9
Wang et al (2013)	Austrália	17 - 18	16,1	0,6	3,75 - 4,99
Soldo et al (2015)	Croácia	~ 15	100	0,152	1,92
Murphy et al (2014)	Estados Unidos	~ 10	15,2	0,61	2 - 2,3
Roth et al (2004)	Chile	-	16,9	0,15	1,8

2.3.10 – Inovação no TRT

Apesar de inédito no Brasil, o TRT já tem cerca de vinte anos de aplicações em alguns países da Europa e nos Estados Unidos. Com todo esse tempo e muitos

ensaios realizados, já existem propostas de melhora e inovação no ensaio, buscando sempre tornar sua execução mais fácil, rápida e acessível.

A inovação mais significativa encontrada em Gustafsson & Nordell (2006) se trata da realização do TRT durante a escavação do poço, acelerando consideravelmente seu processo. Como já citado anteriormente, para a realização do TRT tradicional é necessário esperar alguns dias depois da escavação do poço, devido ao calor que é gerado durante o processo de escavação. A idéia do TRTWD (sigla do inglês Thermal Response Test While Drilling, Traduzindo, Teste de resposta térmica durante a escavação) é utilizar esta energia térmica como fonte para a realização do TRT, transformando algo que atualmente atrasa a realização do ensaio em um ponto positivo.

O Calor gerado pela máquina de escavação é dissipado por um circuito de água que passa pela ponta da mesma. Medindo a temperatura de entrada e saída deste fluído refrigerante (que pode ser água com algum aditivo caso necessário), temos a realização de um TRT durante a escavação do furo. Este TRT pode ser usado para projeto de furos trocadores de calor ou mapeamento geotécnico.

Entre as vantagens, encontra-se o fato de que o TRT comum apenas é capaz de medir a condutividade térmica média do furo, enquanto o TRTWD fornece medições da condutividade térmica ao longo do furo, sendo capaz de encontrar os pontos de maior e menor condutividade. Outro ponto é que o TRT comum geralmente é fruto de parcerias entre empresas diferentes, pois usualmente as empresas de escavação não possuem o equipamento e o conhecimento para a realização do TRT.

Simulações numéricas de TRT e TRTWD feitas por Gustafsson & Nordell (2006) mostram que o TRTWD realmente consegue fazer as medições esperadas, porém a precisão nas medidas de temperatura precisa ser consideravelmente maior, principalmente para a detecção de descontinuidades e outros eventos pontuais na escavação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo destina-se a apresentar os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. O Experimento foi realizado no campo experimental de fundações do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos/SP, localizado no *campus* 1 da USP na cidade de São Carlos, próximo ao centro da cidade.

3.1 – Área dos ensaios

O campo experimental de fundações da EESC-USP está localizado no extremo sul do campus, próximo à entrada da Avenida Doutor Carlos Botelho. Este campo já foi vastamente estudado em dissertações de mestrado e doutorado da própria escola, o que serviu de incentivo para sua utilização neste trabalho.

Como o campo já foi muito utilizado no desenvolvimento de diversos trabalhos, e por isso boa parte dele está ocupado por fundações (e outros equipamentos) construídas previamente com finalidade acadêmica, o que restringiu a área de execução dos furos para uma parte localizada abaixo de algumas árvores, e isso resultou em uma limitação na escolha do equipamento para a realização dos furos.

Machado e Vilar (2003) e Cavalcante *et al* (2007) reúnem um levantamento de caracterização dos solos que compõe o perfil do campo experimental.

Machado e Vilar (2003) apresentam o solo do campo experimental como típico das áreas do centro-oeste do estado de São Paulo. O perfil do subsolo é apresentado na Figura . A camada superficial é uma areia argilosa coluvionar, originária de arenitos dos grupos Botucatu e Bauru e de rochas magmáticas da formação Serra Geral. Essa camada chega a aproximadamente 7 metros de profundidade em média, e mais abaixo se encontra um solo residual de arenito do grupo Bauru (Formação Itaqueri), separada do colúvio por uma linha de seixos. O colúvio é composto principalmente de quartzo, mas contém também altas concentrações de óxidos de alumínio e ferro, comuns de solos tropicais lateríticos. Uma das principais características desse colúvio é o elevado índice de vazios, com

baixo grau de saturação. Característica comum de solos lateríticos do sul do Brasil que geralmente acompanha comportamento colapsível.

Na Figura observam-se resultados de ensaios de campo realizados no campo experimental, SPT e CPT.

Figura 22. Informações do solo do campo experimental de São Carlos - SP. da esquerda para a direita: Perfil do subsolo, distribuição dos grãos e índice de vazios, de acordo com a profundidade (Machado & Vilar, 2003).

Figura 23. Resultados de ensaios de campo realizados no campo experimental (Machado & Vilar (2003) apud Menegotto & Vianna (2000) e Giachetti (2001).

3.2 – Estimativa da condutividade térmica do solo

Como medida recomendada no *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011), foi realizada uma previsão da condutividade térmica do solo estudado. Para fazer essa previsão, conhecendo-se a mineralogia do terreno (Figura 24) foram usados valores de condutividade tabelados encontrados em Farouki (1981) de alguns componentes do solo, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades térmicas de materiais que compõe um solo (Farouki 1981).

Material	Densidade (g/cm ³)	Calor específico (cal/g°C)	Capacidade calorífica volumétrica (cal/cm ³ °C)	Condutividade Térmica		Difusividade Térmica (10 ⁻³ cm ² /s)
				10 ⁻³ cal/cm s °C	W/mK	
Quartzo	2,65	0,175	0,46	20	8,4	43
Outros materiais	2,65	0,175	0,46	7	2,9	15
Matéria Orgânica de solo	1,3	0,46	0,60	0,6	0,25	1,0
Água	1,0	1,00	1,00	1,42	0,6	1,42
Ar	0,0012	0,24	0,00029	0,062	0,026	0,21

A previsão, além de recomendada pelo *Eurocode*, permite ainda fazer uma comparação entre o resultado previsto nas tabelas da literatura e o obtido no ensaio *in situ*.

A partir dos estudos feitos no campo por Cavalcante *et al* (2007) foi possível encontrar dados sobre a umidade e os índices de vazios de acordo com a profundidade do solo (Tabela 5).

Tabela 5. Propriedades do solo do campo experimental segundo a profundidade, obtidos através de amostras indeformadas (CAVALVATE et al 2007).

Prof (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w (%)	13,7	14,6	15,8	16,8	16,4	17,2	19,1	16,7	18,3
γ_d (kN/m ³)	12,5	13,6	13,8	14,3	14,4	14,7	15,2	16,1	16,6
γ (kN/m ³)	14,2	15,6	16,0	16,7	14,8	17,1	18,1	18,8	19,6
e	1,17	0,99	0,96	0,90	0,88	0,84	0,78	0,68	0,63

Para obter a proporção de materiais presentes no solo, utilizou-se a Figura , obtida em Vilar *et al* (1985). Tal amostra foi retirada onde hoje está posicionado o edifício E1 da Escola de Engenharia de São Carlos, que possui altitude inferior em relação ao campo experimental, onde foram realizadas os furos para os ensaios TRT deste trabalho. Porém, é verificado em Bortolucci (1983) que a camada de arenito encontrada no E1 é ainda mais espessa na altura do campo experimental. Apesar das possíveis imprecisões, este levantamento foi utilizado devido a dificuldade e ônus existentes em se obter estes dados.

Figura 24. Composição mineralógica do solo do campo experimental (Vilar *et al* 1985).

Em posse desses dados foi feita uma estimativa em porcentagem volumétrica da composição do solo e obtida uma condutividade térmica média do furo considerando a profundidade que o ensaio será realizado (12 metros).

A partir desta porcentagem de cada material, foi estimada a condutividade térmica do solo através de uma média ponderada pelas quantidades de cada material, presentes em cada metro, e finalmente foi calculada uma média aritmética simples para os 12 metros de profundidade das estacas desta pesquisa.

3.3 – Execução das estacas trocadoras de calor para os ensaios

Primeiramente, devido à presença das árvores no campo experimental, não foi possível utilizar um equipamento de execução de estacas hélice contínua nem hélice segmentada, pois o equipamento não teria acesso ao local. O uso de lama bentonítica foi descartado devido à complexidade de instalação dos tanques de armazenamento, e o equipamento de estaca raiz também foi descartado devido ao elevado custo. Assim a solução foi escavar a seco, procedimento simples e dentro do orçamento do projeto, porém a execução da estaca ficou limitada pelo nível d'água durante a execução das mesmas.

Por isso, o primeiro passo foi executar um poço para monitoramento do nível d'água. Conhecendo sondagens prévias do local, estimou-se que o poço deveria ter 15 metros de profundidade para atingir com certeza o nível d'água. O poço foi escavado manualmente com trado de 4" e escorado com tubos de PVC cortados para entrada da água (Figura 25).

Figura 25. Execução do poço de monitoramento do nível d'água.

No momento da execução, a profundidade do nível d'água era de 12,70 metros. Assim, foi decidido que os furos e as estacas teriam 12 metros de profundidade. O nível d'água continuou a ser monitorado com regularidade para a pesquisa através deste mesmo poço, pois no momento da realização de cada ensaio era importante saber quanto de cada furo estaca inserido abaixo do nível d'água.

Deste modo, duas estacas do tipo escavada a seco, uma com diâmetro de 25cm (ESTACA 1) e outra com 50cm (ESTACA 2), ambas com 12 metros de profundidade foram construídas para esta pesquisa. A locação das estacas no Campo Experimental da EESC e apresentada na Figura 26.

Dentro da ESTACA 2 foram instalados sensores de temperatura (PT100) em três profundidades diferentes: 3,5m, 7,5m, e 11,5m. Além disso, como ilustra a Figura 26, o mesmo tipo de sensor foi instalado nas proximidades desta estaca. Os furos foram feitos com trados manuais de 4" e até 12 metros de profundidades, em ambos os furos os sensores foram instalados com 3,5m, 7,5m e 11,5m de profundidade. Os furos 1 e 2 estão a 1 e 2 metros de distância do centro da estaca 2 (Figura 26). Os sensores foram colocados em barras, e após a instalação destes, os furos foram preenchidos com grout.

Figura 26 Locação das estacas no Campo Experimental de Fundações da EESC/USP.

Previamente a escavação dos furos, foi realizada a montagem da estrutura de suporte dos tubos, responsável por mantê-los espaçados. No caso da estaca maior, a armadura também possui função estrutural, porque será carregada em uma pesquisa de doutorado que está em andamento. Na estaca 1 (menor diâmetro) foi instalado um único "U" loop de tubo para a troca térmica. Na estaca maior foi instalado um duplo "U" loop.

Os tubos instalados dentro das estacas para a troca de calor foram do tipo PEAD (Polietileno de alta densidade), conforme recomendação do *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011), de diâmetro nominal interno de 26 mm (32 x 3mm). Os tubos foram passados por dentro das armaduras, mantendo o espaçamento conforme determinado na mesma norma (Figura 27 e Figura 29).

Porém como a rigidez do tubo impedia que se fizesse uma curva na base da tubulação para formar a configuração em U, foi feita uma montagem com tubos de PVC para água quente e adaptadores para conexão, conforme mostrado na Figura 28. Então esta base foi presa na base da armadura com abraçadeiras de nylon e foram colocados adaptadores para conectar as mangueiras nos tubos (Figura 31).

Figura 27. Colocação dos tubos PEAD na armadura da estaca.

Figura 28. Detalhe da parte inferior do “U” loop de circulação de água dentro da estaca. Esquema montado com tubulação de PVC próprio para água quente.

Figura 29. Tubos colocados na armadura do furo do TRT.

Figura 30. Adaptação para a curva em "U" do tubo, feita em tubulação de água quente.

Figura 31. Instalação da curva utilizando abraçadeiras, já com os adaptadores para conectar as mangueiras.

Para as mangueiras entrarem nos adaptadores, foi utilizado um soprador de alta temperatura para amolecer as extremidades do tubo PEAD, e depois a conexão foi reforçada com uma abraçadeira metálica (Figura 32).

Figura 32. Conexão dos tubos nos adaptadores, utilizando soprador térmico e depois reforço com abraçadeira metálica.

Para finalizar, os tubos foram amarrados com abraçadeiras de nylon em todo seu comprimento, para garantir que permanecessem separados durante a concretagem (Figura 33).

Figura 33. Armadura finalizada com tubos amarrados, pronta para ser inserida no furo.

Com as armaduras prontas, chegou o momento da execução dos furos, colocação das armaduras e posterior concretagem do conjunto. As perfurações para as estacas foram executadas com trado a seco até 12 metros de profundidade (Figura 34).

Figura 34. Perfuração dos furos das estacas.

As armaduras foram colocadas com a ajuda de um caminhão munck, manualmente centralizadas no furo (Figura 35).

Figura 35. Inserindo os tubos no furo da estaca 1.

Posicionados os tubos, foi realizada a concretagem, utilizando uma bomba para concreto (Figura 36). Na estaca de 50 cm de diâmetro, foram colocados

sensores de temperatura no centro em três profundidades diferentes (Figura 37), e para protegê-los durante a concretagem utilizou-se um tubo de PVC que foi removido de acordo com que o concreto era jogado no tubo, que pode ser visto na Figura 36**Figura**.

Figura 36. Finalizando a concretagem da estaca, com o tubo de PVC protegendo os sensores Pt100.

Figura 37. Detalhe Sensor Pt100 preso na armação da estaca 2.

Com os tubos posicionados no subsolo e a concretagem finalizada, passou-se para a montagem do equipamento para fazer o ensaio TRT, uma vez que o concreto

deveria descansar e o ensaio não poderia ser realizado enquanto a reação do concreto não se finalizasse, já que o concreto realiza uma reação química exotérmica durante seu endurecimento, o que influenciaria diretamente o resultado de um TRT.

3.4 – Montagem do equipamento TRT

Para a montagem de todo o aparato necessário para a realização do *Thermal Response Test*, foram pesquisados os materiais disponíveis que mais se aproximavam aos utilizados no exterior para a realização do ensaio, encontrados em artigos e principalmente determinados pelo *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011).

Todo o aparato será abrigado dentro de um container alugado com a intenção de servir de estrutura de apoio no campo protegendo os equipamentos do clima e permitindo que sejam trancados para evitar possíveis furtos ou danos vindos de terceiros (Figura 38).

Figura 38. Container destinado a abrigar os equipamentos para a realização do TRT.

O aquecedor foi feito sob encomenda, sendo um aquecedor tipo boiler, com 100 litros de capacidade de duas resistências independentes para o aquecimento de 1000W cada uma (Figura 39). A escolha foi feita considerando as recomendações do *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011) considerando um solo de elevada condutividade térmica (devido ao resultado da previsão segundo a mineralogia).

Figura 39. Aquecedor de acumulação para a realização do ensaio TRT.

A bomba d'água utilizada foi da marca KSB Hydroblock, com potência de 0,5 cv e 110V. O modelo foi recomendado por um técnico do Departamento de Hidráulica da EESC que auxiliou na montagem do sistema hidráulico, por ser uma das menores bombas encontradas no mercado e possuir uma qualidade confiável. O projeto hidráulico foi verificado com a ajuda de Lucchesi (2014) em seu trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia civil da EESC/USP (Figura 40).

Figura 40. Bomba Hidráulica KSB utilizada no projeto.

Pelas normas o escoamento dentro dos tubos deve se manter turbulento:

$$Rey \geq 3000$$

Sendo Rey o número de Reynolds. Sabendo que o tubo tem paredes lisas:

$$\frac{u_* \varepsilon}{\nu} \geq 70 \quad (17)$$

Para que o escoamento seja turbulento. Os termos da equação são:

- u – Velocidade de atrito
- ε – rugosidade absoluta da parede da tubulação (0,005)
- ν – Viscosidade cinemática da água ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

A partir daí encontra-se o valor de u^* .

Com a equação geral, calcula-se o fator de atrito da tubulação:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re_y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re_y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (18)$$

Sendo D o diâmetro da tubulação. Usando os valores dos materiais utilizados, chega-se a um valor de $f = 0.07$.

A velocidade média da água nesse regime pode ser determinada utilizando as duas variáveis que acabaram de ser determinadas a partir da equação:

$$\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (19)$$

A partir dos valores conhecidos encontramos uma velocidade de 0,15 m/s, e sabendo que a vazão Q é função da velocidade V e da área A :

$$Q = VA, \text{ logo } Q = \frac{0,073 \text{ l}}{\text{s}} \quad (20)$$

A determinação da potência da bomba suficiente para elevar essa vazão é calculada pela equação:

$$P = \frac{9,8 QH}{\eta} \quad (21)$$

Sendo que P é determinada em cavalo vapor (cv).

H é a altura de elevação da bomba, que compõe a altura geométrica e as perdas de carga que compõe o sistema montado.

Novamente com a ajuda de Lucchesi (2014), um projeto preliminar hidráulico do sistema foi feito, para determinar as perdas de carga (Figura 41).

Figura 41. Pré-projeto hidráulico do esquema de ensaio (LUCCHESI 2014).

A perda de carga do projeto se divide entre perda de carga distribuída e perda de carga localizada. A perda de carga distribuída foi determinada pela equação de FAIR-WHIPPLE-HSIAO, e o material considerado foi PVC pois não havia polietileno de alta densidade na tabela.

$$J = 0,0008695 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \Delta H = J L_{tot} \quad (22)$$

As perdas de carga localizadas dependem dos componentes da tubulação, e são determinadas como comprimentos adicionais para o sistema, combinando com o cálculo da perda de carga distribuída. A Tabela 6 Apresenta as perdas locais presentes nesse projeto.

Tabela 6. Perdas de carga locais do sistema.

Componente	Equação	L equivalente (m)
2 cotovelos 90° raio longo	$Le = 0,068 + 20,96D$	0,592
5 cotovelos 90° raio curto	$Le = 0,189 + 30,53D$	0,953
2 Tês 90° passagem direta	$Le = 0,054 + 20,90D$	0,575
1 entrada de borda	$Le = -0,05 + 30,98D$	0,725
1 saída de borda	$Le = -0,05 + 30,98$	0,725

Com esses comprimentos equivalentes, o comprimento total da tubulação fica $27m + 5,57m = 30,57m$

A partir da equação e FAIR-WHIPPLE-HSIAO, a perda de carga total calculada do sistema é de 0,49m.

Assim a altura de elevação da bomba fica em $12,5m + 0,49m$, aproximadamente 13 metros.

Voltando a equação para determinação da potência da bomba:

$$P = \frac{9,8 QH}{\eta} \sim = 0,01 CV \quad (23)$$

A potência necessária é extremamente baixa, o que traz a preferência pela menor bomba disponível no mercado, como foi recomendado.

A bomba de vazão possui uma vazão máxima de 40l/min de trabalho, o que é mais do que suficiente para garantir o escoamento turbulento durante todo o ensaio.

Para controle da vazão durante o ensaio e por recomendação do *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011), também foi instalado um medidor de vazão do tipo turbina (Figura 42). As leituras realizadas pelo medidor garantiram que o regime de escoamento no sistema era turbulento e ainda permitiram avaliar a influência da diferença de vazão na realização do ensaio.

Figura 42. Modelos de medidor de vazão tipo Turbina.

O medidor de vazão foi instalado a uma distância de mais de dez diâmetros da saída da bomba, como recomendado no manual do fabricante, com o intuito de evitar perturbações nas medidas. Com esse mesmo objetivo foi feito um suporte para sua fixação (Figura 43).

Figura 43. Medidor de vazão instalado no sistema.

Para fazer as medidas de temperatura na entrada e na saída do furo, foram utilizados sensores de temperatura Pt100 com ligação á 4 fios (Figura 44), como os instalados no subsolo, porém com dimensões menores, para ficarem bem instalados nos tubos sem contato com a parede.

Figura 44. Sensor Pt100 pequeno.

Foram utilizados “Tês” de 45 graus para colocar os sensores dentro da tubulação em contato direto com a água circulante. O esquema de montagem foi feito conforme a Figura 45, para evitar contato do sensor com as paredes do tubo e garantir que seria medida a temperatura do fluido em circulação.

Figura 45. Esquema de montagem dos sensores Pt100 dentro dos tubos.

O resultado segue no detalhe da Figura 46. Foi utilizada uma união com junta de bronze para possibilitar a transferência do mesmo sistema para a realização do ensaio na estaca de 50 cm de diâmetro.

Figura 46. Suporte de apoio para os sensores de temperatura instalados no interior da tubulação.

É possível observar um registro junto do sensor de medida da entrada. Esse registro tem como objetivo regular a vazão no sistema, com o auxílio do medidor de vazão.

A tubulação da parte acima da superfície do ensaio foi feita com o mesmo material utilizado no subsolo: Os tubos de PEAD (Figura 47). Adaptadores de mangueira para rosca foram utilizados para fazer as conexões com os aparelhos.

Figura 47. Detalhe da ligação entre as magueiras de PEAD e as peças do sistema, por meio de adaptadores espigão-rosca.

Depois de finalizada a montagem e conexão de todos os componentes, os tubos foram envolvidos com uma proteção de polietileno expandido para isolamento térmico semelhante a utilizada nas tubulações de ar condicionado, para evitar trocas com o ambiente que possam vir a interferir nas leituras do ensaio (Figura 48). Os tubos foram envolvidos com a proteção e depois por uma camada de fita *Silvertape* para manter o isolamento preso.

Figura 48. Detalhe do isolante térmico da tubulação.

O sistema para os ensaios TRT montado é apresentado nas Figuras 49 e 50.

Figura 49. Parte superior do sistema interna ao container. À esquerda o aquecedor, no centro a bomba hidráulica e logo a direita o medidor de vazão.

Figura 50. Tubos conectados na estaca 1 (simples “U” loop) e na estaca 2 (duplo “U” loop) para os ensaios TRT.

O primeiro passo depois de concluída a montagem do sistema hidráulico foi enche-lo de água. Foi utilizada uma torneira do próprio campo experimental, ligada ao reservatório por uma mangueira de jardim e com ajuda da própria bomba instalada no sistema (Figura 51). O reservatório não foi completamente cheio, pois a operação foi limitada pelas saídas superiores do mesmo, uma vez que não era desejável que o sistema ficasse sob pressão quando desligado.

Figura 51. Conexão da mangueira responsável pelo abastecimento do ensaio.

Além de sensores de temperatura instalados no solo (Figura 53), também foi instalado um sensor de temperatura destinado a monitorar a temperatura ambiente, para avaliar a sua influência nas medidas do ensaio TRT. O Sensor também é um Pt100, porém maior, conforme a Figura 52.

O sensor foi colocado ao lado do container, em uma posição onde não recebe luz direta do sol, para não fornecer medidas mais realistas e com menor variação para facilitar a análise.

Figura 52. Detalhe do sensor Pt 100 grande.

Figura 53. Furos onde foram instalados sensores Pt 100.

Todos os sensores de temperatura e o medidor de vazão foram testados com multímetro digital antes do início do ensaio para verificar se houve algum dano nos sensores ou nas emendas de cabos realizadas durante a instalação dos mesmos. Todos funcionaram perfeitamente. Foi utilizado um sistema de aquisição HBM MX 1615 com 16 canais de aquisição para o monitoramento dos dados durante os ensaios (Figura 54).

Figura 54. Sistema de aquisição de dados utilizado para armazenamento dos dados do ensaio.

Toda a instrumentação teve seu funcionamento devidamente conferido com multímetro digital para avaliar se as emendas de fios realizadas estavam adequadas, e então se prosseguiu com o primeiro ensaio.

3.5 – Realização do ensaio TRT

Os ensaios TRT neste estudo foram realizados de acordo com os procedimentos indicados nos mais diferentes artigos da literatura, mas sua principal base foi o *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011).

Para a realização do ensaio, é necessário saber a temperatura média do subsolo em todo o comprimento que será ensaiado. Essa temperatura pode ser determinada de duas formas diferentes:

- Utilizando sensores no subsolo em diferentes profundidades e fazendo uma média entre eles.

- Circulando a água no sistema de ensaio com o aquecedor desligado, monitorando as temperaturas de entrada e saída do sistema, que determinam a temperatura média da água em todo o comprimento do furo se a velocidade da água for suficiente (escoamento turbulento). Circulando a água por mais que 20 minutos e com uma taxa de aquisição razoável é possível determinar a temperatura média do subsolo.

No caso, era possível fazer as duas medidas, e foi o que foi feito. Antes de se iniciar o ensaio a água circulava por pelo menos meia hora para determinar a temperatura média do subsolo. Em todos os ensaios ambas as medidas foram bem próximas, o suficiente para serem consideradas “iguais”.

Concluída esta etapa, o aquecedor foi ligado e o monitoramento do ensaio começou. Mais uma vez sua duração era programada para algumas horas além do planejado, para garantir a integridade dos dados.

O aquecedor era ligado com a potência desejada (No caso era possível variar entre 1000W e 2000W), e o horário de início logo anotado. O *Eurocode* determina que as primeiras horas de ensaio devem ser descartadas, pois a temperatura deve estabilizar para realizar as medidas corretas e analisar os dados. Algo entre as 10 e

15 primeiras horas devem ser descartadas para a análise, sendo que é obrigatório que restem, pelo menos, 36 horas de dados para análise.

Muitos estudos recomendam que se estenda a duração dos ensaios para resultados mais precisos, muitos chegando a uma conclusão quase que comum de se realizar os *thermal response tests* com pelo menos 72 horas de duração. Para este trabalho foi determinado que o primeiro ensaio terá 48 horas de duração, pois como já dito a falta de referências de ensaios deste tipo feitos no Brasil dificultou a determinação de alguns parâmetros e assim um ensaio mais rápido com um resultado confiável pôde avaliar se as escolhas de bomba hidráulica, aquecedor e outros foram felizes ou não, e os devidos ajustes poderiam ser feitos para os próximos ensaios feitos para este trabalho e até mesmo outros que irão prosseguir deste.

Durante todo o ensaio o aquecedor deve permanecer ligado, e os parâmetros para avaliação do mesmo serão as temperaturas de entrada e saída, a temperatura ambiente, a temperatura do subsolo medida logo antes da realização do ensaio e é preciso monitorar a vazão para garantir que a mesma permaneceu no regime turbulento por todo o ensaio.

Neste trabalho existiam sensores de temperatura posicionados no subsolo, que permitiram avaliar até que distância o calor inserido no subsolo iria alterar a temperatura no solo em seu entorno. O medidor de vazão utilizado não era compatível com o sistema de aquisição, que só era capaz de registrar medidas de sensores resistivos, porém com uma adaptação recomendada pelo fabricante foi possível ler o sinal de voltagem e com a calibração feita pelo fabricante foi possível medir a vazão e monitorá-la através do computador.

3.6 – Obtenção e tratamento de dados

A frequência de obtenção de dados foi de uma leitura a cada dez segundos, muito mais do que o mínimo necessário recomendado pelo *Eurocode* (CEN/TC 341 N525 2011). O software catman, fornecido pela HBM junto com o sistema de aquisição MX1615 permitiu uma visualização dos dados medidos em tempo real, o que auxiliou muito a realização do ensaio e a posterior análise dos dados (Figura 55).

Figura 55. Sistema de aquisição em funcionamento. Imagem registrada durante acesso por monitoramento remoto.

3.7 – Método de avaliação dos resultados

Existem diferentes formas para avaliação interpretar os resultados deste ensaio. A mais simples que é muito utilizada é a *Kelvin Line Source Theory*, pois é uma forma analítica que comprovadamente apresenta resultados suficientemente confiáveis, tanto que é recomendada como ferramenta de avaliação e cálculo no próprio *Eurocode*. A outra ferramenta recomendada é a avaliação por meio de modelos numéricos, que não será empregada neste trabalho, podendo ser realizada posteriormente.

3.8 – Programa e descrição dos ensaios

Cinco ensaios TRT (thermal response tests) foram realizados neste estudo. O ensaio consiste na circulação de um fluido (neste caso água) dentro da estaca trocadora de calor (circuito fechado) que é submetido a uma taxa constante de calor (potência Q) para aquecer o fluido. Neste caso a potência do aquecedor foi de 1000W.

Quatro testes foram executados na estaca 1 (diâmetro de 0,25m) e um teste foi feito na estaca 2 (diâmetro de 0,50m). Os ensaios na estaca1 foram executados com diferentes valores de vazão de água circulante na estaca para a troca de calor. You et al. (2014) mostrou experimentalmente que a taxa de troca de calor por metro

estaca (q) varia com a vazão da água circulante. Ele concluiu que a vazão mais eficiente corresponde a uma velocidade de fluxo entre 0,5 e 0,6 m/s. Por esta razão, diferentes valores de vazão foram testados para a mesma estaca.

De acordo com o Eurocode (CEN/TC 341N525 2011), o tempo mínimo de duração recomendado para o ensaio TRT é de 48 horas. No entanto, estacas com maior diâmetro necessitam de um maior tempo para alcançar a estabilização na troca de calor que estacas de menor diâmetro.

Loveridge (2012) recomenda que as primeiras horas do ensaio devem ser descartadas, e a interpretação deve começar a partir de um tempo mínimo t_{min} :

$$t_{min} = \frac{5r_b^2}{\alpha} \quad (24)$$

onde:

r_b = raio da estaca;

α = difusidade térmica.

Loveridge et al. (2014) cita que para estacas trocadoras de calor de grande diâmetro, um período inicial maior do ensaio deve ser descartado. Deste modo, no presente estudo, para obter resultados confiáveis, todos os dados relativos a $t < t_{min}$ foram descartados das análises.

Para estimar os valores de t_{min} para a estaca 1 e estaca 2, a difusidade térmica foi estimada pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\lambda}{S_{cv}} \quad (25)$$

onde:

λ = condutividade térmica;

S_{cv} = capacidade calorífica volumétrica;

Brandl (2006) mostrou que a capacidade calorífica volumétrica pode ser calculada por:

$$C_v = \rho_s (c_s + c_w \frac{w}{100}) \quad (26)$$

onde:

ρ_s = densidade do meio solido;

c_s = calor específico dos minerais componentes (para a maioria dos minerais: $c_s = 1000 \text{ W s/kg K}$)

c_w = calor específico da água (4186 W s/kg K)

Para o caso de solo deste estudo, pela Equação 26, capacidade calorífica volumétrica é igual a $2,91 \times 10^6 \text{ Ws/m}^3\text{K}$. Portanto, assumindo-se uma condutividade térmica de $3,0 \text{ W/mK}$ para o caso de solo estudado (usando os dados de mineralogia do perfil) e usando-se a Equação 25, o valor calculado de difusidade térmica é de $1.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Assim, pela Equação 24, o valor de t_{min} (para descarte no início do ensaio) para a estaca1 é em torno de 21h e para a estaca 2, em torno de 84h. Portanto, os ensaios TRT na estaca 1 foram programados para 72 horas de duração, e na estaca 2 com 229 horas (quase 10 dias). No entanto, um dos ensaios na estaca 1 teve a duração de 48 horas.

Em todos os ensaios, a potência nominal aplicada pelo aquecedor foi de 1000W. No entanto, Loveridge et al. (2014) cita que este valor não tem acurácia, e recomenda que se calcule a potência aplicada no ensaio $Q \text{ (W)}$ pela Equação 27. Portanto, nesta presente pesquisa a potência foi calculada por:

$$Q = S_c \dot{m} (T_{out} - T_{in}) \quad (27)$$

onde:

$(T_{out} - T_{in})$ = diferença entre as temperaturas (do fluido) de entrada e de saída da estaca;

$\dot{m}$ = vazão em massa (kg/s);

S_c = capacidade específica do fluido (J/kg K).

A Tabela 7 descreve o programa de ensaios desta pesquisa. Para a estaca 1, quatro diferentes vazões foram testadas para avaliarmos o efeito desta na taxa de troca de calor por metro de estaca. Além disso, como os ensaios foram realizados em diferentes épocas do ano, e o nível d'água é variável, portanto o efeito desta variação na resposta térmica da estaca também foi avaliado.

O efeito do diâmetro da estaca e do número de U-loops (número de tubos trocadores de calor) do sistema foi verificado pela comparação entre os ensaios TRT-1 e TRT-5, ambos realizados na mesma época (mesmo N.A.) e com vazão similar.

No mais, para avaliar o efeito do teor de umidade do solo em torno da estaca nas propriedades térmicas do sistema, um anel para infiltração de água no solo foi instalado em torno da estaca 1 para o ensaio TRT-4. Para isso, foi cravado ao redor da estaca um anel de ferro (Figura 56). Este anel foi preenchido por água, e mantido assim até que seu nível se mantivesse estável, o que garante que o solo em torno da estaca foi saturado em todo seu comprimento. Com o auxílio de uma boia, o anel se manteve cheio d'água durante toda a duração do ensaio.

Figura 56. Saturação do solo em torno da estaca1 para o ensaio TRT-4.

Tabela 7. Descrição dos ensaios TRT realizados nesta pesquisa.

Ensaio	Estaca	Diâmetro da estaca (m)	“U” loop	Duração (horas)	Nível do N.A, (m)	Vazão da água l/min
TRT-1	estaca1	0.25	simples	48	-10,8	28 (0,88 m/s)
TRT-2				72	-11,2	11,6 (0,36 m/s)
TRT-3				72	-11,3	19,4 (0,61 m/s)
*TRT-4				72	-11,5	17,4 (0,55 m/s)
TRT-5	estaca2	0.5	duplo	229	-11,0	26 (0,82 m/s)
* O ensaio TRT-4 foi realizado após a saturação da estaca1						

3.9 – Método de interpretação dos resultados

Olgun and McCartney (2014) comentam que para otimizar o projeto de sistemas de bombas de calor ligada ao solo (sistemas GSHP, ground source heat pump), quatro parâmetros devem ser avaliados com acurácia: (1) condutividade térmica do sistema, (2) capacidade calorífica específica, (3) taxa de troca de calor por metro de estaca, e (4) resistência térmica do sistema. Estes autores citam que o ensaio TRT é o método mais comum para determinar estas propriedades térmicas. As equações usadas (teoria da fonte linear) para estimar estes parâmetros são apresentadas a seguir.

- **Condutividade térmica do sistema**

A condutividade térmica do sistema pode ser calculada por:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi H} * \frac{1}{a} \quad (28)$$

Onde:

Q = quantidade de calor injetada no sistema (W),

H = profundidade da estaca,

a = inclinação da reta ajustada da relação entre temperatura média do fluido dentro da estaca e o logaritmo natural do tempo de ensaio.

- **Taxa de troca de calor por metro de estaca**

A taxa de troca de calor por metro de estaca pode ser estimada por:

$$q = \frac{\Delta T_{fluid} * m * c_{fluid}}{H} \quad (29)$$

Onde:

q = taxa de troca de calor por metro de estaca (W/m);

ΔT_{fluid} = diferença entre a temperatura (do fluido) de entrada e de saída da estaca;

m = vazão em massa;

c_{fluid} = calor específico do fluido circulante na estaca (água neste caso).

- **Resistencia térmica**

A resistencia térmica da estaca trocadora de calor pode ser calculada por:

$$R_b = \frac{\Delta T_f}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_g t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (30)$$

Onde:

ΔT_f = diferença entre a temperatura inicial do solo e a temperatura do fluido no tempo t ;

t = tempo;

γ = constante de Euler (0,5772)

4 RESULTADOS

4.1 Temperatura do solo

Os valores de temperatura registrados em três diferentes profundidades (-3.5m, -7.5m e -11.5m) e na superfície do terreno ao longo do período entre abril e agosto de 2015 são mostrados na Figura 57.

Figure 57. Temperatura do solo no Campo Experimental da EESC/USP de São Carlos.

4.2 Nível do lençol freático

A variação do nível d'água no local de ensaio foi registrada entre novembro de 2014 e agosto de 2015, e é apresentada na Figura 58.

Figura 58. Variação donível d'água no Campo Experimental de Fundações da EESC/USP em São Carlos.

4.3 Ensaio TRT-1

O ensaio TRT-1 foi realizado na estaca 1, com uma duração de 48 horas. As Figuras 59 e 60 mostram os resultados da temperatura do fluido, do ambiente, e da quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio.

Para a estimativa da condutividade térmica pela Equação 28, o gráfico da Figura 61 foi feito para obtenção do coeficiente angular da reta a .

Para a interpretação dos resultados, as primeiras 21 horas de teste foram descartadas ($t_{\min}$ calculado de 21 horas).

As Figuras 62 e 63 mostram a variação da resistência térmica e da taxa de troca de calor por metro de estaca durante o ensaio. A Tabela 8 apresenta os resultados das propriedades térmicas obtidas neste ensaio.

Tabela 8. Propriedades térmicas obtidas no TRT-1 (21 horas descartadas).

Ensaio	Estaca	Valor médio de calor injetado (W)	Condutividade termica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistencia termica media (mK/W)
TRT-1	Estaca 1	948	2.8	79	0,14

Figura 59. Temperaturas registradas durante o ensaio TRT-1.

Figura 60. Quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio TRT-1.

Figura 61. Temperatura média do fluido x $\ln(t)$ para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-1.

Figura 62. Variação da resistência térmica durante o ensaio TRT-1.

Figura 63. Variação da taxa de troca de calor durante o ensaio TRT-1.

4.4 Ensaio TRT-2

O ensaio TRT-2 foi realizado na estaca 1, com uma duração de 72 horas. As Figuras 64 e 65 mostram os resultados da temperatura do fluido, do ambiente, e da quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio.

Para a estimativa da condutividade térmica pela Equação 28, o gráfico da Figura 66 foi feito para obtenção do coeficiente angular da reta a .

Para a interpretação dos resultados, as primeiras 21 horas de teste foram descartadas ($t_{\min}$ calculado de 21 horas).

As Figuras 67 e 68 mostram a variação da resistência térmica e da taxa de troca de calor por metro de estaca durante o ensaio. A Tabela 9 apresenta os resultados das propriedades térmicas obtidas neste ensaio.

Figura 64. Temperaturas registradas durante o ensaio TRT-2.

Figura 65. Quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio TRT-2.

Figura 66. Temperatura média do fluido x $\ln(t)$ para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-2.

Figura 67. Variação da resistência térmica durante o ensaio TRT-2.

Figura 68. Variação da taxa de troca de calor durante o ensaio TRT-2.

Tabela 9. Propriedades térmicas obtidas no TRT-2 (21 horas descartadas).

Ensaio	Estaca	Valor médio de calor injetado (W)	Condutividade térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistencia térmica média (mK/W)
TRT-2	Estaca1	1188	3,2	99	0,13

4.5 Ensaio TRT-3

O ensaio TRT-3 foi realizado na estaca1, com uma duração de 72 horas. As Figuras 69 e 70 mostram os resultados da temperatura do fluido, do ambiente, e da quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio.

Para a estimativa da condutividade térmica pela Equação 28, o gráfico da Figura 71 foi feito para obtenção do coeficiente angular da reta a .

Para a interpretação dos resultados, as primeiras 21 horas de teste foram descartadas ($t_{\min}$ calculado de 21 horas).

As Figuras 72 e 73 mostram a variação da resistência térmica e da taxa de troca de calor por metro de estaca durante o ensaio. A Tabela 10 apresenta os resultados das propriedades térmicas obtidas neste ensaio.

Figura 69. Temperaturas registradas durante o ensaio TRT-3.

Figura 70. Quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio TRT-3.

Figura 71. Temperatura média do fluido x $\ln(t)$ para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-3.

Figura 72. Variação da resistência térmica durante o ensaio TRT-3.

Figura 73. Variação da taxa de troca de calor durante o ensaio TRT-3.

Tabela 10. Propriedades térmicas obtidas no TRT-3 (21 horas descartadas).

Ensaio	Estaca	Valor médio de calor injetado (W)	Condutividade térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistencia térmica média (mK/W)
TRT-3	Estaca 1	1260	2,8	105	0,10

4.6 Ensaio TRT-4 (ensaio com solo sujeito a infiltração de água)

O ensaio TRT-4 foi realizado na estaca1, com uma duração de 72 horas. As Figuras 74 e 75 mostram os resultados da temperatura do fluido, do ambiente, e da quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio. Para este ensaio o solo ao longo da estaca foi saturado.

Para a estimativa da condutividade térmica pela Equação 28, o gráfico da Figura 76 foi feito para obtenção do coeficiente angular da reta a .

Para a interpretação dos resultados, as primeiras 21 horas de teste foram descartadas ($t_{\min}$ calculado de 21 horas).

As Figuras 77 e 78 mostram a variação da resistência térmica e da taxa de troca de calor por metro de estaca durante o ensaio. A Tabela 11 apresenta os resultados das propriedades térmicas obtidas neste ensaio.

Figura 741. Temperaturas registradas durante o ensaio TRT-4.

Figura 75. Quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio TRT-4.

Figura 76. Temperatura média do fluido x $\ln(t)$ para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-4.

Figura 77. Variação da resistência térmica durante o ensaio TRT-4.

Figura 78. Variação da taxa de troca de calor durante o ensaio TRT-4.

Tabela 11. Propriedades térmicas obtidas no TRT-4 (21 horas descartadas).

Ensaio	Estaca	Valor médio de calor injetado (W)	Condutividade térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistência térmica média (mK/W)
TRT-4	Estaca1	1213	3,1	101	0,12

4.7 Ensaio TRT-5 (estaca de maior diâmetro com duplo “U” loop)

O ensaio TRT-5 foi realizado na estaca2 (maior diâmetro e com duplo U-loop), com uma duração de 229 horas (pouco menos de dez dias). As Figuras 79 e 80 mostram os resultados da temperatura do fluido, do ambiente, e da quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio.

Como neste caso foi ensaiada uma estaca de maior diâmetro, a duração do ensaio foi de 229h. Portanto, para a obtenção das propriedades térmicas da estaca, diferentes períodos foram descartados dos dados iniciais do ensaio: 10,5h, 21h, 42h, 63h e 84h (equivalentes a $0,125 t_{min}$, $0,25 t_{min}$, $0,5 t_{min}$, $0,75 t_{min}$, t_{min}). As Figuras 81 a 85 mostram as curvas de $T_{mean} \times LN(t)$ para os diferentes tempos descartados.

As Figuras 86 e 87 mostram a variação da resistência térmica e da taxa de troca de calor por metro de estaca durante o ensaio. A Tabela 12 apresenta os resultados das propriedades térmicas obtidas neste ensaio para os diferentes tempos de ensaio descartados ($0,125 t_{min}$, $0,25 t_{min}$, $0,5 t_{min}$, $0,75 t_{min}$, t_{min}).

Figura 79. Temperaturas registradas durante o ensaio TRT-5.

Figura 80. Quantidade de calor injetada no sistema durante o ensaio TRT-5.

Figura 81. Temperatura média do fluido x ln(t) para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-5 (84 horas descartadas).

Figura 82. Temperatura média do fluido x ln(t) para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-5 (63 horas descartadas).

Figura 83. Temperatura média do fluido x ln(t) para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-5 (42 horas descartadas).

Figura 84. Temperatura média do fluido x ln(t) para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-5 (21 horas descartadas).

Figura 85. Temperatura média do fluido x ln(t) para calcular a condutividade térmica do ensaio TRT-5 (10.5 horas descartadas).

Figura 86. Variação da resistência térmica durante o ensaio TRT-5.

Figura 87. Variação da taxa de troca de calor durante o ensaio TRT-5.

Tabela 12. Propriedades térmicas obtidas no TRT-5 (diferentes períodos descartados).

Período inicial descartado (h)	Valor médio de calor injetado (W)	Condutividade Térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistência térmica média (mK/W)
10,5 (0,125 t_{min})	1316	4,1(0,90)	109,7	0,08
21 (0,25 t_{min})	1320	4,2 (0,86)	110	0,08
42 (0,5 t_{min})	1320	4,4 (0,75)	110	0,08
63 (0,75 t_{min})	1318	4,4 (0,67)	110	0,08
*84 (t_{min})	1318	3,9 (0,61)	109,6	0,08
* t_{min} estimado por: $t_{min} = 5r_b^2/\alpha_{solo}$ (using $\lambda_{solo} = 3$ W/mK and $\alpha_{solo} = 1.03 \times 10^{-6}$ m ² /s)				

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Variação de temperatura dentro da estaca 2 e no solo próximo durante e após o ensaio TRT-5.

Durante o ensaio TRT na estaca 2, as temperaturas dentro da estaca e nos dois furos próximos (com distancias radiais do eixo da estaca iguais a 1m e 2m) foram monitoradas. No entanto, ocorreu um problema no sensor de temperatura instalado na profundidade de -3,5m dentro da estaca, por isso esses dados não são apresentados.

A Figura 88 mostra valores de temperatura registrados durante os 9 dias do ensaio TRT-5. Esta figura mostra que a temperatura no interior da estaca aumenta durante o ensaio, principalmente na profundidade de -7,5m (em comparação com a parte inferior). As temperaturas continuaram subindo ao longo do ensaio, porém, com o decorrer do tempo, a taxa de crescimento da temperatura tende a estabilizar

Figura 88. Variação de temperatura dentro da estaca durante o ensaio TRT-5.

As Figuras 89 e 90 mostram a variação de temperatura dentro dos furos 1 e 2, registradas durante o ensaio TRT-5. Estas figuras indicam que a temperatura do

solo ao redor da estaca aquecida aumenta nos raios de 1m e 2m distantes da estaca.

Figura 89. Variação da temperatura no solo a uma distância radial de 1m do eixo da estaca durante o ensaio TRT-5.

Figura 90. Variação da temperatura no solo a uma distância radial de 2m do eixo da estaca durante o ensaio TRT-5.

A Figura 89 indica que o aumento de temperatura foi maior no solo próximo a parte inferior da estaca (entre 7,5 e 11,5 m de profundidade), provavelmente devido ao fato que a parte superior sofre influência da troca de calor com a atmosfera.

Pelas Figuras 89 e 90 pode-se concluir que à medida que a distância radial a partir da estaca aumenta, a taxa de aumento da temperatura do solo é mais baixa, conforme esperado. No furo situado a 2m da estaca (Figura 90), o aumento da temperatura foi inferior a 1 °C. Este fato indica que a distância radial de 2m deve estar perto do limite da região de solo que é influenciada pelo aquecimento da estaca.

Após o termino do ensaio TRT-5, as temperaturas continuaram monitoradas, de modo a fornecer informação sobre o tempo necessário para o solo e a estaca recuperarem a temperatura inicial. As Figuras 91 e 92 mostram a queda de temperatura na estaca e no solo durante um período de 27 dias.

A Figura 91 mostra que a temperatura no interior da estaca é reduzida rapidamente após o fim do teste de aquecimento. A figura 92 ilustra o equilíbrio térmico no solo a 1m de distância da estaca. Durante os primeiros dias após o ensaio, tanto na estaca quanto no solo próximo, a diminuição da temperatura com o tempo é mais significativa, no entanto, a taxa de redução da temperatura vai diminuindo com o tempo.

Figura 91. Variação de temperatura na estaca após o termino do ensaio TRT-5.

Figura 92. Variação de temperatura no solo à 1m da estaca após o termino do ensaio TRT-5.

5.2 Efeito da temperatura ambiente nos resultados dos ensaios

Embora os tubos usados para conectar o sistema nas estacas fossem revestidos com material de isolamento térmico, as curvas obtidas a partir dos cinco ensaios TRT indicam que a temperatura ambiente influencia a temperatura do fluido circulante e, conseqüentemente afeta levemente as curvas de taxa de troca de calor e de resistência térmica.

Nas Figuras 59, 64, 69, 74 e 79, em que são ilustradas as temperaturas do fluido (de entrada e de saída da estaca) nota-se um ligeiro aumento da temperatura do fluido com o aumento da temperatura do ambiente, e uma ligeira diminuição quando ocorre a redução da temperatura ambiente (ciclo repetido a cada 24 horas).

5.3 Propriedades térmicas da estaca trocadora de calor

As propriedades térmicas determinadas a partir dos resultados dos cinco ensaios TRT realizados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Propriedades térmicas obtidas nos ensaios TRT.

Ensaio	Diâm. da estaca (m)	“U” loop	duração (horas)	Prof. do N.A, (m)	Vazão (l/min)	Condutividade Térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resist. térmica média (mK/W)
TRT-1	0,25	simples	48	-10,8	28	2,8	79	0,14
TRT-2			72	-11,2	11.6	3,2	99	0,13
TRT-3			72	-11,3	19.4	2,8	105	0,10
TRT-4			72	-11,5	17.4	3,1	101	0,12
TRT-5	0,5	duplo	229	-11,0	26	4,2	110	0,08

A partir dos resultados dos ensaios na estaca1 (TRT-1 ao TRT-4), observou-se que:

- A pequena variação do nível do lençol freático não influenciou as propriedades térmicas do sistema;
- A taxa de troca de calor é influenciada pela vazão, como mostrado na Figura 93 (fato também observado em You et al 2014);
- A vazão influencia a diferença entre as temperaturas (do fluido) de entrada e de saída da estaca durante o teste, conforme apresentado na Figura 93;
- A variação da vazão não influenciou os resultados de condutividade térmica e da resistência térmica do sistema;
- A saturação da estaca1 para o ensaio TRT-4 não influenciou os resultados das propriedades térmicas, provavelmente porque a água penetrou apenas no solo ao longo da interface da estaca, e, conseqüentemente, não afetou a troca de calor radial.

Como mostrado na Tabela 12, o ensaio TRT-5 (na estaca 2) proporcionou maior valor de condutividade térmica em comparação com os ensaios na estaca1. Neste caso, o diâmetro da estaca e o número de U-loops do tubo dentro da estaca é maior, o que causou o aumento na condutividade térmica e na taxa de troca de calor.

Além disso, a resistência térmica obtida para a maior estaca é menor em comparação com os ensaios na estaca1, provavelmente devido ao uso de um duplo U-loop para a troca de calor. Loveridge e Powrie (2014) mostraram que a resistência

térmica diminui quando o número de U-loops instalados no interior da estaca aumenta. Estes autores concluíram que estacas de maior diâmetro fornecem maior oportunidade para instalar mais tubos, sem causar interação entre os tubos, portanto, têm potencial para reduzir a resistência térmica total.

Loveridge (2012) comentou que minimizar a resistência térmica é importante para melhorar o desempenho térmico (no caso de estacas trocadoras de calor, por meio da maximização do número de tubos).

5.4 Efeito da vazão do fluido circulante na estaca

A Figura 93 mostra o efeito da vazão na taxa de troca de calor por metro na estaca1 (TRT1 a TRT-4). Esta figura indica que o ensaio com vazão 19.4 l/min (0.61 m/s) foi o mais eficiente. Os resultados estão de acordo com o encontrado em You et al. (2014). Estes autores constataram que a velocidade de fluxo ideal varia entre 0,5 m e 0,6 m/s.

Figura 93. Variação da taxa de troca de calor por metro com a vazão do fluido.

A Figura 94 ilustra a relação entre a vazão do fluido e a diferença entre as temperaturas do fluido ($T_{IN}-T_{out}$) durante os ensaios efetuados na estaca1. A diferença de temperaturas do fluido é menor para valores de vazão mais elevados, devido ao menor período de tempo em que a água se mantém dentro da estaca trocando calor com o solo.

Figura 94. Variação da diferença de temperatura do fluido ($T_{in} - T_{out}$) com a vazão.

5.5 Efeito do tempo descartado no início do ensaio TRT

Para a análise do teste TRT-5, cinco diferentes intervalos de tempo para descarte na primeira parte do ensaio foram usados para a determinação das propriedades térmicas. No entanto, como mostrado na Tabela 12 e na Figura 94, a magnitude de tempo negligenciado não influenciou os parâmetros térmicos obtidos.

Por outro lado, como mostrado na Figura 95 o aumento do tempo negligenciado provoca uma diminuição do coeficiente de determinação da relação linear entre a temperatura média do fluido e $\ln(t)$ (fato também observado em Wood et al. 2010). Esta relação é usada para determinar a condutividade térmica do sistema.

Figura 95. Relação entre o tempo descartado de ensaio (horas) com o coeficiente de determinação e com a condutividade térmica.

5.6 Comparação com estudos prévios.

A Tabela 14 possibilita comparar os resultados de condutividade térmica encontrada em estudos anteriores com os valores obtidos nessa pesquisa. A temperatura do solo do local do estudo é a maior que todos os outros locais apresentados nessa tabela.

Tabela 14. Resultados de condutividade térmica obtidos em estudos anteriores.

Estudo	Pais	Temperatura do solo (°C)	Profundidade do sistema trocador de calor (m)	Diâmetro do sistema (m)	Condutividade térmica (W/mK)
Gehlin & Nordell (1998)	Sweden	8 - 10,5	115 - 197	0,1 - 0,16	3,2 - 5,5
Georgiev <i>et al</i> (2010)	Bulgaria	-	42	0,18	0,86
You <i>et al</i> (2014)	China	~ 16	18	0,42	2,38 - 2,78
Banks <i>et al</i> (2013)	UK	~ 12,4	~ 93	~ 0,143	~ 2,99
Loveridge <i>et al</i> (2014)	UK	17,7	26	0,3	2,4 - 2,9
Wang <i>et al</i> (2013)	Austrqlia	17 - 18	16,1	0,6	3,75 - 4,99
Soldo <i>et al</i> (2015)	Croatia	~ 15	100	0,152	1,92
Murphy <i>et al</i> (2014)	USA	~ 10	15,2	0,61	2 - 2,3
Roth <i>et al</i> (2004)	Chile	-	16,9	0,15	1,8
Presente estudo	Brasil	~24,5	12	0,25 - 0,5	2,8 – 4,2

Como mostrado em Olgun e McCartney (2014), um terreno é classificado com excelente potencial geotérmico, se a taxa de troca de calor for em torno de 25 W / ft (aproximadamente 80 W/m). Portanto, como os resultados de taxa de troca de calor por metro de estaca encontrados neste estudo varia de 79 a 110 W/m, o local investigado pode ser considerado excelente.

Embora as estacas trocadoras de calor tenham sido instaladas em um perfil quase todo de solo não saturado (menor condutividade térmica), cerca de 60% do solo ensaiado é composto de quartzo (material de elevada condutividade térmica), e cerca de 20% é composto por óxidos formados pela laterização. Provavelmente esta composição mineral justifica os resultados encontrados no presente trabalho.

5.7 Método de análise dos resultados

Os resultados dos ensaios TRT na estaca 1 (diâmetro 0,25m) e na estaca 2 (0,50m de diâmetro) foram analisados utilizando-se o modelo tradicional da fonte linear.

Conforme citado anteriormente, Loveridge et al. (2014) concluíram que a parcela inicial dos dados, referente a equação 24 deve ser descartada da análise em estacas de pequeno diâmetro, e assim foi feito também no presente estudo. Também Loveridge (2012) comentou que os ensaios TRT em estacas de até 0,30m devem ser analisados pelo método da fonte linear, e que a duração dos ensaios deve ser aumentada em relação ao mínimo de 48 horas para permitir uma avaliação mais precisa das propriedades térmicas do solo. Para estacas maiores do que 0,30 m, este autor sugeriu que a duração do teste deve ser suficientemente aumentada para permitir que a resistência térmica da estaca seja alcançada.

Com base nas recomendações acima mencionadas, a duração do ensaio na estaca maior (TRT-5) foi de aproximadamente 9,5 dias. Para os ensaios na estaca de 0,25m, a duração foi de 72 horas, com exceção do TRT-1.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental para se determinar as propriedades térmicas de estacas trocadoras de calor no perfil de solo do campo experimental da EESC/USP em São Carlos, que é muito semelhante a muitos solos do país. As principais conclusões desta pesquisa foram:

- O equipamento construído possibilitou obter resultados que podem ser considerados confiáveis, principalmente para ensaios com duração superior a 72 horas. No entanto, existem melhorias que podem ser feitas, como no isolamento térmico e a utilização de uma bomba com uma regulação de vazão própria (sem que ela fosse feita pelo registro). Porém este equipamento desenvolvido foi o primeiro construído para realização de ensaios TRT no Brasil.

- Os efeitos do aumento do diâmetro e da quantidade de tubos no interior da estaca foram avaliados em conjunto, mostrando que existe uma melhora na troca de calor, aumento de 50% na condutividade térmica e de 40% na taxa de troca de calor em comparação com o teste na estaca de menor diâmetro com vazão similar. Não foi possível quantificar o quanto que cada um dos efeitos proporciona de aumento separadamente que seria possível com a construção de mais furos.

- A pequena variação do nível do lençol freático não influenciou os resultados dos ensaios.

- A variação da vazão do fluido circulante na estaca afeta a taxa de troca de calor e a diferença entre as temperaturas de entrada e de saída da estaca durante o ensaio.

- O aquecimento da estaca durante o ensaio de maior duração (9,5 dias) aumentou a temperatura do solo em um raio de 2m do eixo da estaca.

- Os ensaios TRT realizados no campo experimental da EESC/USP para esta pesquisa foram os primeiros realizados no Brasil. No entanto, os resultados encontrados ficaram dentro da faixa de variação encontrada em diferentes locais do mundo.

- Esperava-se que os resultados das propriedades térmicas não seriam tão elevados, uma vez que o solo estudado era não saturado, porém os valores

encontrados foram altos. Tais resultados são justificados pelo fato de o solo possuir uma grande quantidade de quartzo e óxidos oriundos da laterização em sua composição, esses minerais apresentam ótimas propriedades de condução de calor e muito provavelmente foram os responsáveis por exercer uma compensação no aspecto térmico do solo.

- Os resultados encontrados apresentam perspectivas otimistas sobre o desenvolvimento da tecnologia GSHP e semelhantes no país, uma vez que os resultados de taxa de troca de calor são considerados excelentes por Olgun & McCartney (2014).

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Para o desenvolvimento de novos equipamentos, fica a sugestão da utilização de uma bomba com regulação de vazão/potência, utilização de um aquecedor de passagem. Este último foi procurado um para o desenvolvimento deste trabalho, porém todos tinham potência muito maior que o que o indicado. Provavelmente um aquecedor adequado deveria ser fabricado, uma vez que no mercado ele não foi encontrado.

- A análise dos resultados neste trabalho foi feita somente utilizando o teorema da fonte de calor linear, analiticamente. Interpretar os dados através de outras ferramentas mais complexas, como modelagem numérica, podem revelar pontos importantes, como considerar de forma mais adequada a influência da temperatura ambiente, o que não foi possível pelo método analítico.

- Com os resultados deste trabalho é possível desenvolver uma pesquisa sobre o sistema GSHP com uma abordagem voltada para a questão energética, para melhor avaliar a viabilidade econômica desta tecnologia com um caso real.

- O Brasil é um país com grande diversidade geológica e climática dentro de seu território. A análise de um caso particular em São Carlos, apesar de um primeiro passo importante analisando um solo bastante comum no país, não é suficiente para garantir a eficiência da aplicação da tecnologia GSHP em território nacional. São necessárias análises em outros locais, pois cada caso deve ser avaliado considerando suas particularidades.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 33 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 221 p.

Arboit, N.K.S.; Decezaro, S.T.; Amaral, G.M.; Liberalesso, T.; Mayer, V.M. e Kemerich, P.D.C. (2013). *Potencialidade do uso da Energia Geotérmica no Brasil – Uma revisão da literatura*. Revista do Departamento de Geografia – USP, Vol. 26, pp. 155 – 168.

ASHRAE Handbook. (2011). – HVAC Applications, SI Edition, Supported by ASHRAE Research.

Austin, W. A. (1998) *Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties*. Dissertação de Mestrado. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma.

Bandos, T.V.; Montero, A.; Fernández, E.; Santander, J.L.G.; Isidro, J.M.; Pérez, J.; Córdoba, P. J. F. e Urchueguía, J.F. (2008). *Analytical Studies of Heat Conduction in Thermal Response Tests*. European Thermal-Sciences Conference, Eindhoven, Holanda.

Bandos, T.V.; Montero, A.; Fernández, E.; Santander, J.L.G.; Isidro, J.M.; Pérez, J.; Córdoba, P.J.F. e Urchueguía, J.F. (2009). *Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations*. Geothermics Vol. 38, pp. 263 – 270.

Banks, D.; Withers, J G.; Cashmore G. e Dimelow, C. (2013). *An overview of the results of 61 in situ thermal response tests in the UK*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Vol 46. pp. 281 – 291.

Batchelor, T. (2005). *Geothermal Energy: a major renewable energy resource*. ICE Civil Engineering 14211, p. 40 – 44.

Berberich, H.; Fisch, N.; Hahne, E. (1994). *Field experiments with a single duct in water saturated Claystone*. International Conference of Thermal Energy Storage. Espoo, Finlândia.

Bortolucci, A. A. (1983) *Caracterização Geológico-Geotécnica da região Urbana de São Carlos-SP, a parti de Sondagens de Simples Reconhecimento*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil.

Brandl, H. (2006). *Energy Foundations and Other Thermo-Active Ground Structures*. Revista Géotechnique, vol. 56(2) pp. 81 – 126.

Cavalcante, E. H.; Danzinger, F. A. B.; Giacheti, H. L.; Coutinho, R. Q.; Souza, A.; Kormann, A. C. M.; Belicanta, A.; Pinto C. S.; Costa Branco, C. J. M.; Ferreira, C. V.; Carvalho, D.; Marinho, A. M.; Cintra, J. C. A.; Dourado, K. C. A.; Moraes, L. S.; Albuquerque Filho, L. H.; Almeida, M. S. S.; Gutierrez, N. H. M.; Albuquerque, P. J. R.; Chamecki, P. R.; Cunha, R. P.; Teixeira, R. S.; Menezes, S. M. e Lacerda, W. A. (2007). *Campos experimentais brasileiros*. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia 111, pp. 99 – 205.

Comitê Europeu de Normalização, Eurocode 7, TC 341 – Ground Investigation and testing, N 525 – Geothermal Testing – Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock using a Borehole Heat Exchanger, 2011.

Dickson, M.H.; Fanelli, M. (2004). *What is Geothermal Energy?* Instituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Itália.

ECES, I (2013). Annex 21 Thermal Response Test (TRT) Final report <http://www.iea-eces.org/files/a4.1_iea_eces_annex_21_final_report_1.pdf>

Elmozughi, A.F.; Muntasser, M.A.; Nordel, B. (2009) *Simulation of Vertical U Tube Exchanger*. International Conference of Thermal Energy Storage. Estocolmo, Suécia.

Eskilson, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Tese de Doutorado. Departament f Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Suécia.

Farouki, O. T. (1981). *Thermal Properties of Soils*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, New Hampshire, United States. 151 p.

Gehlin, S. (1998). *A Mobile Equipment for Thermal Response Test: testing and evaluation*. Dissertação de Mestrado. Division of water resources engineering. Department of Environmental Engineering. Luleå University of Technology. Luleå. Suécia. 41 p.

Gehlin, S. (2002). *Thermal response test: Method Development and Evaluation*. Tese de Doutorado. Division of water resources engineering. Department of Environmental Engineering. Luleå University of Technology. 44 p. Luleå. Suécia.

Gehlin, S. e Hellström, G. (2003). *Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation*. ASHRAE Transactions, Vol. 109(1).

Gehlin, s. e Nordell, B. (1998) *Thermal Response Test of Boreholes – Results from In Situ Measurements*. Transaction of The Geothermal Project at Richard Stockton College Conference, 1998.

Georgiev, A.; Popov, R. e Tabakova, S. (2010) *The Bulgarian Experience in Thermal Response Tests*. Proceedings of Wolrd Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 2010. p. 1 – 7.

Gustafsson, A.M. e Gehlin, S. (2006) *Thermal Response Test – Power Injection Dependence*. Proceedings of EcoStock 2006, Stockton, NJ. p. 1 – 10.

Gustafsson, A. M. e Nordell, B. (2006). *Thermal Response Test While Drilling*. Proceedings of 2006 EcoStock – 10th International Conference on Thermal Energy Storage.

He, M.M. e Lam, H.N. (2006). *Study of geothermal cooling storage system with energy piles*. EcoStock conference. Richard Stockton College: Atlantic City, USA.

Katzenbach, R.; Ramm, H. e Choudhury, D. (2011). *Combined pile-raft foundations – A sustainable foundation concept*. IV workshop of the YELGIP: Shallow Geothermal applications in civil engineering, Darmstadt, Alemanha.

Laloui, L.; Nuth, M. e Vulliet, L. (2006) *Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 30(8), pp. 763 – 781.

Lhendup, T.; Aye, L. e Fuller, R.J. (2014). *In Situ Measurement of borehole thermal properties in Melbourne*. Applied Thermal Engineering, Vol. 73, pp. 285 – 293.

Loveridge, F.; Powrie, W. (2013). *Performance of Piled Foundations as Thermal Heat Exchangers*. 18^o International Conference in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, França, Vol. 1, pp. 3371 – 3374.

Loveridge, F.; Powrie, W. e Nicholson, D. (2014). *Comparison of two diferente models for pile response test interpretation*. Acta Geotechnica, vol 9, pp. 367 – 384.

Lucchesi, L. (2014). *Projeto e estudo paramétrico para a realização de ensaio de resposta térmica (TRT) no campus experimental de fundações da Escola de Engenharia de São Carlos – USP*. Trabalho de conclusão de curso. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, Brasil, 61 p.

Luo, J.; Rohn, J.; Bayer, M. e Priess, A. (2013). *Thermal Efficiency Comparison of Borehole Heat Exchangers with diferente drillhole Diameters*. Energies, vol 6, pp. 4187 – 4206.

Machado, S. L. e Vilar O. M.; *Geotechnical characteristics of na unsaturated soil deposit at São Carlos, Brazil*. In: Tan, T. S.; Phoon, K. K.; Hight, D. W. e Leroueil, S. (eds). *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*. Swets & Zetlinger, Lisse, 2003. p. 1305-1321.

Mallmann, B.M. (2011). *Análise computacional do impacto da iluminação e dos vidros na demanda energética de um edifício comercial*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Olgun, C.G. e McCartney, J.S. (2014). *Outcomes from the International Workshop on Thermoactive Geotechnical Systems for Near-Surface Geothermal Energy: From Research to Praticce*. The Journal of the Deep Foundations Institute, Vol. 8(2), p. 58 – 72.

Popiel, C.O.; Wojtkowiak, J. e Biernacka, B. (2001) *Measurements of temperature distribution in ground*. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25(5), p. 301 – 309.

Roth, P.; Georgiev, A.; Busso, A. e Barraza E. (2004) *First in situ Determination of ground and borehole thermal properties in Latin America*. Renewable Energy, vol 29, pp. 1947 – 1963.

Sanner, B.; Hellström, G.; Spitler, J. e Gehlin, S. (2005) *Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application*. Proceedings of World Geothermal Congress. Antalya, Turquia. p. 1 – 9.

Sanner, B.; Mands, E. e Sauer, M.K. (2008). Grundmann, E.; *Thermal Response Test, a Routine Method to Determine Thermal Ground Properties for GSHP Design*. International IEA Heat Pumping Conference. Zurique, Suíça.

Soldo, V.; Leposa, L.; Boban, L. e Bovic, S. (2015). *Implementation of the Distributed Thermal Response Test at Characteristic Geological regions throughout Croatia*. Proceedings of World Geothermal Congress, Meulbourne, Australia. p. 1 – 9.

Vilar, O. M.; Bortolucci, A. A.; Rodrigues, J. E. (1985). *Geotechnical Characteristics of Tropical Cenozoic Sediment from São Carlos Region, (Brazil)*. Proceedings of First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília, Brasil, p. 461 – 470.

Vilela, M.M. (2004). *Estudo de Método Experimental para Determinar a Potencialidade do uso de Energia Geotérmica à baixa profundidade*. Dissertação de Doutorado. Programa inter-unidades de pós graduação em Energia. Universidade de São Paulo. 278 p.

Wang, B.; Bouazza, A.; Singh, R.M.; Barry-Macaulay, D., Haberfield; C., Chapman, G. e Baycan, S. (2013). *Field Investigation of a Geothermal Energy Pile: Initial Observations*, 18^o International Conference in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, França, Vol. 1, pp. 3415 – 3418.

Wang, H. e Qi, C. (2008) *Performance study of underground termal storage in a solarground coupled heat pump system for residential buildings*. Energy and Buildings, Vol. 40(7), pp. 1278 – 1286.

Witte, H.; van Gelder, G.; Spitler, J., (2002). *In situ Thermal Conductivity Testing: A Dutch Perspective*. ASHREA Transactions 108, pp. 268 – 272.

You, S.; Cheng, X.; Guo, H. e Yao, Z. (2014). *In-situ experimental study of heat Exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers*. Energy and Buildings, Vol. 79, pp. 23 – 31.

Zervantonakis, I. K. e Reuss, M. (2006). *Modellierung eines Thermal Response Tests. Proceeding of Otti Profiforum Oberfalechennahe Geothermie in Freising*, Alemanha, pp. 147 – 159.

Zervantonakis, I. K. e Reuss, M. (2006). *Quality Requirements of a Thermal Response Test*. ECOSTOCK 06, 10ª Conferência de armazenamento de energia térmica. Stockton, Estados Unidos. p. 435 – 441.