

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

**VALIDAÇÃO DO ENSAIO TRT PARA ESTUDO  
PARAMÉTRICO DA TROCA DE CALOR DE UMA ESTACA  
DE ENERGIA EM UM SOLO TROPICAL**

**HENRY CASTILLO OROZCO**

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

**CO-ORIENTADOR: PROF<sup>a</sup>. CRISTINA DE HOLLANDA  
CAVALCANTI TSUHA, D.Sc.**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-262/16**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**VALIDAÇÃO DO ENSAIO TRT PARA ESTUDO  
PARAMÉTRICO DA TROCA DE CALOR DE UMA ESTACA  
DE ENERGIA EM UM SOLO TROPICAL**

**HENRY CASTILLO OROZCO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.

APROVADA POR:

---

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

---

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

PETER JOHN BOURNE-WEBB, Ph.D. (IST-Lisboa)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 17 DE FEVEREIRO DE 2016.

## FICHA CATALOGRÁFICA

CASTILLO OROZCO, HENRY.

Validação do Ensaio TRT para Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical [Distrito Federal] 2016

xii, 169 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Modelagem Numérica

2. Estaca trocadora de calor

3. Resposta Térmica

4. Estudo Paramétrico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTILLO, H. (2016). Validação do Ensaio TRT para Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-262/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Henry Castillo Orozco

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Validação do Ensaio TRT para Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical

GRAU / ANO: Mestre / 2016

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

---

HENRY CASTILLO OROZCO

CLN 403 Bloco E 205

CEP 70835-550

Brasília, DF- Brasil.

hencasor@hotmail.com

Dedico este trabajo a mis fuentes de vida y alegría:

A Dios,  
Por traerme al mundo, concederme tantas oportunidades en mi vida y existir en mi corazón

A mi padre:  
Por su infinito apoyo en todas mis metas profesionales y personales,  
a quien le debo todo lo que soy

A mi madre:  
Por su apoyo incondicional afectivo y moral en todas mis decisiones,  
y enseñarme las cosas buenas de la vida

A mi novia Mónica:  
Por el infinito apoyo, infinito amor, la infinita paciencia, y  
la gran entrega humana

## AGRADECIMENTOS

Quiero comenzar mis agradecimientos dándole gracias a Dios por permitirme llegar aquí y terminar con éxito todos los objetivos trazados. También, agradecer a la profesora Gloria Echeverri en Medellín-Colombia por brindarme la confianza y la oportunidad de comenzar este proceso.

Agradecimientos a toda la planta de profesores del Programa de Pos graduación en Geotecnia de la Universidad de Brasília por el conocimiento transmitido en todo este tiempo y a las instituciones CNPq y CAPES por el respaldo y apoyo financiero.

Agradecimientos al Prof. Renato Pinto da Cunha, por su firmeza, confianza y disponibilidad en todo momento, por su la ayuda y entrega profesional durante el año de ejecución de este trabajo. También a la profesora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha de la Universidad de São Paulo EESC por la orientación, disponibilidad y ayuda en los momentos cruciales.

Agradecimientos a los colegas: Luis Antônio Bandeira (USP-EESC), por la constante ayuda durante el trabajo conjuntamente realizado; Matthieu Velle, joven francés de mucha simpatía, quien dio su apoyo, entrega y confianza durante el inicio de la investigación.

Agradecimientos a Jedson Santos, Jaqueline Roman y Luis Pereira de la empresa COMSOL Ltda Brasil, quienes con su disponibilidad y ayuda conseguí resolver las adversidades relacionadas al manejo del software COMSOL.

Agradecimientos a los compañeros conocidos durante mi estadía en el país: colombianos, brasileros, cubanos, españoles, africanos, franceses y demás lugares del mundo, muchas gracias por el compañerismo. Quiero dar las gracias especialmente al colega Carlos Moreno por acogerme en los días de llegada a la ciudad y ayudarme con las diferentes diligencias.

Infinitas gracias a mi prometida esposa Mónica Sandoval por el apoyo, el amor, la confianza y las constantes palabras de aliento para seguir adelante, gracias por soportar mi ausencia física y mis cambios de genio durante estos dos años.

Finalmente, quiero agradecer a mis papas y hermanos por el apoyo moral, emocional y económico que me dieron durante todo este tiempo. Gracias infinitas a todos por la comprensión y atención. Los amo, y este logro también es de todos ustedes!

## RESUMO

Os sistemas trocadores de calor acoplados ao solo têm sido usados por anos como sistemas de aclimatização de prédios residenciais e comerciais. Estes sistemas foram adaptados para estruturas de fundação com o fim de trocar energia térmica com o solo. Atualmente, estacas de energia são implementadas em muitos países para substituir parte da energia elétrica e outros tipos de fontes de energia. O Brasil é o nono consumidor de energia elétrica em todo o mundo, onde muita dessa energia é utilizada para o uso de condicionamento climático. Por esta razão pesquisas relacionadas com estacas de energia no Brasil são estimuladas com o fim de reduzir o consumo de energia elétrica. Testes de resposta térmica têm sido realizados em uma estaca de energia instalada no campo experimental da Universidade de São Paulo na região subtropical de São Carlos. Simultaneamente, se realizaram simulações de sistemas de estaca de energia com propriedades térmicas obtidas durante o ensaio para avaliar o desempenho da troca de calor dos sistemas na região. Para a análise numérica, são avaliados os efeitos térmicos devido à variação em propriedades térmicas do solo e concreto, geometria da estaca, vazão, posição do nível freático de água, espessura da tubulação e temperatura média de entrada. Adicionalmente, se determina o espaçamento ótimo entre estacas para permitir o melhor desempenho das estacas. Em este documento se apresentam resultados e análises de modelos simulados no software COMSOL, utilizando os módulos *Heat Transfer* e *Non-Isothermal Pipe Flow*, e com eles, obtendo assim a configuração ótima de trabalho. Foi observada a melhora do comportamento térmico da estaca com o crescimento dos valores em parâmetros geométricos, o número de tubulações e da vazão em condições de fluxo turbulento. Parâmetros como a espessura da tubulação e condutividade térmica do solo e concreto proporcionam aportes energéticos não muito significativos no resultado da troca de calor da estaca estudada.

## ABSTRACT

Ground-Coupled Heat Exchanger Systems has been used as acclimatization system for residential and commercial buildings. This system was adapted to pile foundations in order to exchange thermal energy with the ground. Currently, this foundation system has been implemented in many countries to replace an important part of electrical and other sources of energy. Brazil is the ninth largest consumer of electrical energy in the world, and much of this energy is used for air conditioning. For this reason, researchers in Brazil are investigating the use of energy piles in order to reduce the consumption of electricity. Thermal response tests have been carried out on a heat exchanger pile at the geotechnical experimental site of the University of São Paulo in São Carlos city, region of subtropical climate. Simultaneously, using the thermal properties obtained in these tests, numerical analysis has been performed to investigate the heat exchange performance of energy piles installed in this site in São Carlos. For this numerical analysis, the effect of variations due to soil and concrete properties, pile geometry, groundwater level, pipe thickness and the flow rate on the pile thermal response were evaluated. Additionally, is determined the optimal space between piles that allows a better performance of each pile. The current paper presents the results obtained by the analysis models simulated to found an optimal configuration of an energy pile through the software COMSOL, using Heat Transfer and Non-Isothermal Pipe Flow modules. From this work, it was observed that the optimal configuration was obtained for a turbulent flow condition in piles with greater length and diameter. The effects of thickness in pipe, the thermal conductivity of the surrounding soil and concrete were not very influential on the thermal performance of the heat exchanger pile.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CONTEXTO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. CONCEITOS GERAIS DO PROBLEMA .....	6
2.1. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO TÉRMICO EM REGIÕES TROPICAIS .....	6
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	7
2.3. ENTENDIMENTO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SOLO. ....	8
2.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS .....	10
2.4.1. Condutividade térmica .....	10
2.4.2. Capacidade térmica específica .....	11
2.4.3. Difusividade térmica .....	12
2.5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS .....	13
2.5.1. Fluidos refrigerantes e aditivos .....	13
2.5.2. Concreto .....	14
2.5.3. Tubulação.....	15
2.6. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM ESTACAS DE ENERGIA.....	16
2.7. METODOS NUMÉRICOS .....	16
2.7.1. COMSOL Multiphysics v 5.1 .....	16
2.7.2. Hipóteses do problema .....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. SISTEMAS GEOTÉRMICOS COM BOMBAS DE CALOR (GSHP).....	20
3.2. SISTEMAS GSHP NO MUNDO.....	23

3.2.1.	América .....	23
3.2.2.	Ásia.....	24
3.2.3.	Europa .....	26
3.3.	TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA (TRT).....	28
3.4.	VISÃO GERAL DOS SISTEMAS DE TROCADORES DE ENERGIA .....	31
3.5.	EQUAÇÕES DE CONTINUIDADE E BALANCE ENERGÉTICO EM UMA ESTACA DE ENERGIA.....	34
3.6.	MODELOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO.....	37
3.7.	MODELO DE CALCULO DA CAPACIDADE CALORÍFICA ESPECÍFICA DOS SOLOS.....	40
3.8.	REFERENCIAS NO TEMA DE ESTACAS DE ENERGIA. ....	40
3.8.1.	Comportamento termo-hidro-mecânico das estacas de energia.....	41
3.8.2.	Comportamento termo-hidráulico das estacas de energia.....	45
3.8.3.	Resposta térmica de estacas de energia.....	48
3.9.	ENSAIOS DE RESPOSTA TÉRMICA PARA ESTACAS TROCADORAS DE CALOR RELIZADOS EM SÃO CARLOS, SP. ....	51
3.10.	PARÂMETROS MONITORADOS DURANTE O ENSAIO TRT-1 .....	54
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	57
4.1.	CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO TRT.....	57
4.1.1.	Descrição do ensaio TRT .....	58
4.2.	INFORMAÇÃO GERAL DA LOCAÇÃO DO ENSAIO .....	61
4.2.1.	Geologia e caracterização geotécnica do solo.....	62
4.2.2.	Perfil do solo e propriedades dos materiais.....	64
4.2.3.	Climatologia .....	65
4.2.4.	Mineralogia do solo.....	66
4.3.	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO.....	68
5.	ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTACA TROCADORA DE CALOR .....	72
5.1.	ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MODELO .....	72

5.1.1.	Avaliação da geometria do domínio.....	74
5.1.2.	Avaliação do limite do domínio .....	75
5.1.3.	Avaliação do tipo de elemento .....	79
5.1.4.	Avaliação da densidade da malha .....	81
5.1.5.	Resumo do estudo da sensibilidade dos elementos finitos.....	84
5.2.	CALIBRAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO TRT .....	84
5.2.1.	Procedimento das modelagens em COMSOL Multiphysics.....	86
5.2.2.	Condições iniciais e de contorno do modelo.....	87
5.2.3.	Simulação numérica da resposta térmica do sistema de estaca com condutividade térmica do solo calculada y experimental. ....	88
5.2.4.	Simulação da resposta térmica do solo após o ensaio TRT com condutividade térmica calculada (modelo numérico multicamada). ....	90
5.2.5.	Comparação de resultados numéricos vs experimentais .....	95
5.3.	MODELAGEM PARAMÉTRICA.....	97
5.3.1.	Procedimento das modelagens .....	101
5.3.2.	Processamento dos resultados .....	102
5.3.3.	Resultados da simulação paramétrica .....	103
5.3.3.1.	Comprimento da estaca .....	103
5.3.3.2.	Diâmetro da estaca.....	105
5.3.3.3.	Número de tubulações .....	107
5.3.3.4.	Vazão nos diferentes tipos de tubulação.....	109
5.3.3.5.	Posição do nível de água freática .....	112
5.3.3.6.	Condutividade térmica do concreto .....	114
5.3.3.7.	Condutividade térmica das camadas de solo .....	116
5.3.3.8.	Temperatura de entrada do fluido.....	119
5.3.3.9.	Espessura da tubulação .....	122
5.3.3.10.	Análise do espaçamento entre estacas .....	123
5.4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA .....	127

5.5.	CONCLUSÕES PARCIAIS DA ANALISE NUMÉRICA.....	132
5.5.1.	Estudo de sensibilidade e calibração numérica do TRT .....	132
5.5.2.	Estudo paramétrico do ensaio TRT .....	132
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO .....	135
6.1.	CONCLUSÕES .....	135
6.2.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	137
7.	BIBLIOGRAFIA .....	139
8.	ANEXOS .....	145

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores gerais das propriedades térmicas em diferentes tipos de solos de acordo à normativa Alemã para propósitos geotérmicos (VDI 4640) .....	10
Tabela 2.2 - Valores gerais das propriedades térmicas dos diferentes tipos de concretos. ISO/FDIS 10456:2007(E). (ISO, 2007) .....	14
Tabela 2.3 - Valores gerais utilizados para as diferentes propriedades térmicas em plásticos. ISO/FDIS 10456:2007(E).(ISO, 2007) .....	15
Tabela 3.1 - Unidades GSHP instaladas e Capacidade Energética destes sistemas em países Europeus no ano 2010 maiores que 10 MWt.(EurObserv'ER, 2011).....	26
Tabela 3.2 - Valores do parâmetro $\beta$ .....	39
Tabela 3.3 - Valores dos parâmetros $\chi$ e $\eta$ .....	39
Tabela 3.4 - Autores que estudaram o comportamento termo-hidro-mecânico de estacas de energia. (Bourne-Webb, 2015).....	41
Tabela 3.5 - Autores que estudaram o comportamento termo-hidráulico de estacas de energia. (Bourne-Webb, 2015).....	45
Tabela 3.6 - Autores que estudaram estes de resposta térmica. (Bourne-Webb, 2015).....	48
Tabela 3.7 - Autores que estudaram modelos paramétricos de ensaios TRT .....	48
Tabela 3.8. Intervalos selecionados para a simulação paramétrica. ....	51
Tabela 3.9. Descrição dos ensaios TRT realizados (Neto, 2015) .....	52
Tabela 3.10. Propriedades térmicas obtidas nos ensaios TRT (Neto, 2015).....	53
Tabela 4.1. Análise granulométrica dos materiais no solo de estudo (Machado, 1998).....	63
Tabela 4.2 - Pesos específicos, umidades e relação de vazios do solo (Machado, 1998).....	65
Tabela 4.3 - Conteúdo de quartzo para cada camada de solo .....	68
Tabela 4.4 - Valores das propriedades básicas e conteúdo de quartzo dos solos.....	68
Tabela 4.5 - Condutividade térmica segundo Kersten (1949).....	69
Tabela 4.6 - Condutividades térmica segundo Johansen (1975).....	69
Tabela 4.7 - Condutividades térmica segundo Côte and Konrad (2005) .....	69
Tabela 4.8 - Condutividade térmica segundo Lu et al. (2007).....	70
Tabela 4.9 - Tabela resumo da condutividade térmica do solo determinada pelas diferentes correlações empíricas e semi-empíricas. ....	70
Tabela 4.10 - Valores finais das características do solo.....	71
Tabela 5.1 - Propriedades térmicas dos materiais .....	73
Tabela 5.2 - Resultados das modelagens - Geometria do domínio .....	75
Tabela 5.3 - Resultados térmicos considerando os limites laterais do domínio com relação ao comprimento da estaca .....	76
Tabela 5.4 - Resultados térmicos considerando os limites em altura do domínio com relação ao comprimento da estaca .....	76
Tabela 5.5 - Resultados dos modelos com relação aos limites do domínio de solo.....	80
Tabela 5.6 - Resultados da densidade da malha no domínio de solo .....	83
Tabela 5.7 - Resumo dos resultados numéricos da troca de calor no ensaio TRT.....	90
Tabela 5.8 - Modelos TRT com diferentes comprimentos de estaca .....	97
Tabela 5.9 - Modelos TRT com diferentes de diâmetros de estaca .....	98
Tabela 5.10 - Modelos TRT com diferentes vazões em diferentes tipos de tubulações .....	98

Tabela 5.11 - Modelos TRT com diferentes tubulações .....	99
Tabela 5.12 - Modelos TRT com diferentes posições do nível freático .....	99
Tabela 5.13 - Modelos TRT com diferentes valores de condutividade térmica para o concreto. .....	99
Tabela 5.14 - Modelos TRT com valores de variação da condutividade térmica do solo .....	100
Tabela 5.15 - Modelos TRT com diferentes temperaturas de entrada na estaca.....	100
Tabela 5.16 - Modelos TRT com diferentes espessuras na parede da tubulação.....	100
Tabela 5.17 - Modelos TRT composto por duas estacas em diferentes espaçamentos.....	101
Tabela 5.18 - Resultados da troca de calor considerando a variação do comprimento da estaca. .....	104
Tabela 5.19 - Resultados da troca de calor considerando a variação do comprimento da estaca. .....	106
Tabela 5.20. Resultados da troca de calor considerando a variação do numero de tubulações. .....	108
Tabela 5.21 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em uma tubulação U.....	109
Tabela 5.22 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em sistema de tubulações com 2 tubulações U. ....	110
Tabela 5.23 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em um sistema de tubulações com 3 tubulações U. ....	111
Tabela 5.24 - Resultados da troca de calor considerando a variação do nível da água freática .....	113
Tabela 5.25 - Resultados da troca de calor considerando a variação da condutividade térmica do concreto da estaca.....	115
Tabela 5.26 - Condutividade térmica das camadas do solo considerando variações entre -20% e 20% do valor calculado. ....	117
Tabela 5.27 - Resultados da troca de calor considerando a variação de $k$ nas camadas de solo. .....	118
Tabela 5.28 - Resultados da troca de calor com a variação da temperatura de entrada. ....	121
Tabela 5.29 - Resultados da troca de calor com a variação da espessura da tubulação. ....	122
Tabela 5.30 - Resultados da troca de calor entre duas estacas separadas. ....	126
Tabela 5.31 - Resultados da troca de calor considerando a variação da espessura da tubulação. .....	128

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Processos da dissertação.....	5
Figura 2.1 - Variação geral da temperatura na superfície do solo. (Hillel, 1998).....	9
Figura 2.2 - Flutuação da temperatura do solo com a profundidade. (Hillel, 1998).....	9
Figura 2.3 - Variação geral da condutividade térmica com a saturação em solos arenosos, argilosos e orgânicos. (Hillel, 1998) .....	11
Figura 2.4 - Variação geral da capacidade térmica especificados solos com a saturação.....	12
Figura 3.1 - Categorias dos sistemas GSHP (Hemmingway, 2011) .....	21
Figura 3.2 - Exemplos de sistemas GSHP em. a) estruturas de pavimento b) túneis de energia .....	22
Figura 3.3 - Equipamento para o Teste de Resposta Térmica.(Gehlin, 2002) .....	29
Figura 3.4 - Envoltória logarítmica para a temperatura de saída com o tempo. (Gehlin, 2002) .....	30
Figura 3.5 - Estrutura energética de um sistema trocador de energia com COP=4 .....	32
Figura 3.6 - Bomba de calor para um Sistema GSHP (European GSHP Association, 2011)..	33
Figura 3.7 - Nível de água no solo do Campo Experimental da EESC (Neto, 2015) .....	52
Figura 3.8 - Temperatura do solo no Campo Experimental da EESC (Neto, 2015).....	53
Figura 3.9 - Variação da temperatura superficial monitorada durante o TRT (Neto, 2015)....	55
Figura 3.10 - Temperatura do fluido de na entrada da estaca durante o TRT. Ver ANEXO C (Neto, 2015). .....	55
Figura 3.11 - Vazão registrada na entrada da estaca (Neto, 2015).....	56
Figura 4.1 – Esquema do ensaio TRT .....	59
Figura 4.2 – Estaca, o sistema de bomba de calor e elementos TRT (Neto, 2015).....	60
Figura 4.3 - Locação da Universidade de São Paulo- EESC. ....	61
Figura 4.4 - Locação da estaca de estudo no campo experimental de Fundações USP/EESC. ( <a href="http://www5.eesc.usp.br/sgs/campfund.htm">http://www5.eesc.usp.br/sgs/campfund.htm</a> ) .....	62
Figura 4.5 - Perfil geológico da região de São Carlos (Bortolucci, 1983).....	63
Figura 4.6 - Perfil de solo localizado no Campo experimental USP/EESC.....	64
Figura 4.7 - Temperatura máxima, mínima e media do ambiente ao longo do ano na cidade de São Carlos, SP. (CEPAGRI, 2015) .....	66
Figura 4.8 - Perfil mineralógico do solo na região de São Carlos (Vilar et al. 1985).....	67
Figura 5.1. Modelo base para calibração no software COMSOL Multiphysics. ....	73
Figura 5.2 - Modelos com domínio de forma paralelepípedo (esquerda) e cilíndrico (direita). .....	74
Figura 5.3 - Temperatura dos domínios de solo com diferentes diâmetros após 48 h .....	77
Figura 5.4 - Temperatura dos domínios de solo com diferentes alturas após 48 h .....	78
Figura 5.5 - Diferentes elementos no domínio: Hexaédrico, Prismático e Tetraédrico. ....	79
Figura 5.6 - Comportamento da temperatura de saída com diferentes elementos finitos. ....	80
Figura 5.7 - Densidades de malha no domínio de solo em um modelo de estaca de energia ..	82
Figura 5.8 - Resposta térmica para cada domínio de solo avaliado com diferentes densidades de malha. ....	83
Figura 5.9 - Estado final do modelo após estudo de sensibilidade dos modelos finitos e condições iniciais e de contorno (unidades em metro). ....	85

Figura 5.10 - Temperatura do solo no início do TRT (Neto, 2015).....	87
Figura 5.11 - Resposta térmica da estaca obtida numericamente no software COMSOL. ....	89
Figura 5.12 - Evolução da taxa de troca de calor normalizada durante 48 h de ensaio. ....	90
Figura 5.13 - Resultados de temperatura no espaço após as 24 h de ensaio .....	91
Figura 5.14 - Resultados de temperatura no espaço após as 48 h de ensaio. ....	92
Figura 5.15 - Direção do fluxo de calor após 48h de ensaio. ....	92
Figura 5.16 - Linhas isotérmicas em seção longitudinal do modelo após 48 h de ensaio.....	93
Figura 5.17 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 3 m de profundidade. ....	94
Figura 5.18 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 6 m de profundidade. ....	94
Figura 5.19 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 9 m de profundidade. ....	95
Figura 5.20 - Comparação entre as respostas experimentais e numéricas. ....	95
Figura 5.21 - Variação normalizada do resultado numérico respeito ao resultado experimental. .....	96
Figura 5.22 - Taxas de troca de calor total considerando variação no comprimento na estaca. .....	105
Figura 5.23 - Taxas de troca de calor normalizada considerando variação no comprimento. ....	105
Figura 5.24 - Taxas de troca de calor considerando diferentes diâmetros na estaca.....	107
Figura 5.25 - Configurações de estacas com tubulação U simples, duplo U e triplo U.....	107
Figura 5.26 - Taxas de troca de calor considerando o número de tubulações.....	108
Figura 5.27 - Taxas de troca de calor considerando as diferentes configurações de tubulação e vazões. ....	111
Figura 5.28 - Taxas de troca de calor considerando diferentes profundidades do nível freático. .....	114
Figura 5.29 - Taxas de troca de calor considerando diferentes valores de condutividade térmica do concreto (estaca).....	116
Figura 5.30 - Taxa de troca de calor com a variação da condutividade térmica do solo. ....	119
Figura 5.31 - Evolução da temperatura de saída considerando a temperatura média de entrada na estaca. ....	120
Figura 5.32 - Taxas de troca de calor considerando diferentes temperaturas na entrada da estaca. ....	121
Figura 5.33 - Taxas de troca de calor considerando as diferentes espessuras na tubulação ..	123
Figura 5.34 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com $S=0.20$ m .....	124
Figura 5.35 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com $S=0.80$ m .....	125
Figura 5.36 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com $S=2.00$ m .....	125
Figura 5.37 - Avaliação da troca de calor em uma das estacas em diferentes espaçamentos	127
Figura 5.38 - Intervalos de variação da taxa de troca de calor total (Q). ....	129
Figura 5.39 - Intervalos de variação da taxa de troca de calor normalizada ( $Q_L$ ). ....	129
Figura 5.40 - Intervalos de variação do fluxo de calor com relação ao modelo padrão TRT0 .....	131

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

## ABREVIACÕES

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BHE	Borehole Exchanger
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFA	Continuous Flight Auger
COP	Coefficient Of Performance
EPE	Empresas pesquisadoras de Energia do Brasil
ET	Espessura da tubulação
FIRJAN	Federação das Indústrias do Rio de Janeiro
GHEs	Ground Heat Exchangers
GSHP	Ground-Source Heat Pump
GSHPA	Ground-Source Heat Pump Association (UK)
HDPE	High-Density Polyethylene
HX	Heat Exchanger ou elemento trocador de calor
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Id	Identificação
IGSHPA	International Ground-Source Heat Pump Association
ISO	International Organization for Standardization
kc	Condutividade térmica do concreto
ks	Condutividade térmica do solo
MWt	Megawatt thermal
N.A	Nível de água
NT	Número de tubulações
Num	Número
p.e	Por exemplo

sat	Saturado, saturação.
SP	Estado de São Paulo, Brasil
TE	Temperatura de entrada em uma estaca de energia
TRT	Thermal Response Test, Teste de Resposta Térmica
Vz	Vazão
Vz2U	Vazão em cada tubulação de uma configuração tipo U duplo
Vz3U	Vazão em cada tubulação de uma configuração tipo U triplo
VzU	Vazão em uma tubulação tipo U simples

## NOMENCLATURAS

$A_d$	Amplitude da temperatura diária do solo	$^{\circ}\text{C}$
$A_y$	Amplitude da temperatura anual na superfície do solo	$^{\circ}\text{C}$
$c_p$	Capacidade de calor específica dos materiais	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$c_w$	Capacidade de calor específica da água	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$d_d$	Profundidade característica diária de temperatura constante	m
$d_y$	Profundidade característica anual de temperatura constante	m
$D_e$	Diâmetro da estaca	m
$h_{\text{eff}}$	Coefficiente de transferência térmica efetiva	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
$h_{\text{ext}}$	Coefficiente de transferência térmica parede externa	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
$h_{\text{int}}$	Coefficiente de transferência térmica parede interna	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
$k$ ou $\lambda$	Coefficiente de condutividade térmica	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$K_e$	Número de Kersten	-
$k_{\text{HDPE}}$	Coefficiente de condutividade térmica da tubulação	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_s$	Condutividade térmica dos sólidos	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_{\text{sat}}$	Condutividade térmica do solo saturado	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_{\text{seco}}$	Condutividade térmica do solo seco	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_o$	Condutividade térmica média dos minerais (sem quartzo)	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_{qz}$	Condutividade térmica do quartzo	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$k_w$	Condutividade térmica da água	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
$L_e$	Comprimento da estaca	m
$m$	Massa	kg
$m_c$	Inclinação da curva em escala logarítmica T vs t	$\text{K s}^{-1}$
$q$	Calor	J
$q_z$	Fração de quartzo presente no solo	-
$Q$	Fluxo de calor ou taxa de troca de calor total	W
$Q_L$	Fluxo de calor ou taxa de troca de calor normalizada	$\text{W m}^{-1}$
$\dot{Q}$	Densidade de fluxo de calor	$\text{W m}^{-2}$
$q_e$	Potencia de calor injetada	W

$Q_{\text{entrada}}$	Vazão de entrada	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$q_{\text{wall}}$	Intercambio de calor na tubulação	$\text{W m}^{-1}$
$q_z$	Fração de quartzo (quantidade volumétrica)	%
$r_e$	Raio da secção da estaca	m
$R_{\text{dom}}$	Raio do domínio que conforma o modelo numérico	m
$R_e$	Resistência térmica da estaca trocadora de calor	$\text{K m W}^{-1}$
$t$	Tempo	s
$t_0$	Fase constante de tempo	s
$T_{\text{ave,y}}$	Temperatura média anual do solo	$^{\circ}\text{C}$
$T_c$	Temperatura do coletor em ensaio TRT	$^{\circ}\text{C}$
$T_e$	Temperatura média do elemento trocador	$^{\circ}\text{C}$
$T_f$	Temperatura média do fluido	$^{\circ}\text{C}$
$T_g$	Temperatura do concreto	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{pe}}$	Temperatura da parede da estaca	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{entrada}}$	Temperatura de entrada do fluido	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{saida}}$	Temperatura de saída do fluido	$^{\circ}\text{C}$
$T_E$	Temperatura do fluido na entrada da estaca	$^{\circ}\text{C}$
$V_z$	Vazão	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$z$	Localização em Profundidade	m
$\lambda_f$	Coefficiente de condutividade do fluido	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$T$	Diferença de Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$\alpha$	Difusividade térmica	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\rho$	Densidade aparente (bulk density)	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_w$	Densidade da água	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_d$	Densidade seca do solo	$\text{kg m}^{-3}$
$\Delta$	Variação ou diferença	-
$\omega_d$	Frequência diária	$\text{s}^{-1}$
$\omega_y$	Frequência anual	$\text{s}^{-1}$

---

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTO

Nos últimos 40 anos o mundo tem trabalhado constantemente nos âmbitos ambientais ligados à sustentabilidade dos países. No início da década dos 70s as energias renováveis foram consideradas como uma alternativa à energia elétrica, tanto para a disponibilidade energética, como para melhorar o impacto ambiental a partir de uma "energia mais limpa". Hoje, a contaminação, a utilização de recursos renováveis e as opções de substituir a energia elétrica são consideradas temas centrais desta busca que cada vez torna de maior importância.

Um fator relevante que obriga ter novas soluções energéticas é a independência energética de recursos como o petróleo. Como resposta da dinâmica do preço e as consequências no mercado energético, se geram grandes avanços tecnológicos que dão resposta ao problema. Entre os anos 1970 e 1980 a crise do petróleo e derivados estimularam programas de pesquisa em diversos países do mundo (especialmente na Europa), que tinham como objetivo determinar novas fontes energéticas, potenciais de recursos renováveis e tecnologias ambientais. Foi assim que muitos países desenvolveram com o tempo soluções alternativos à fonte do petróleo que ajudarem na geração de energia considerando o impacto ambiental.

Desse modo, América Latina se une também na busca da independência energética do petróleo como também na solução das deficiências estratégicas de cada país. Segundo a *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)* no 2002 a maioria dos países da América Latina tinham como principais fontes energéticas o Petróleo e a hidroenergia.

O Brasil, o maior país da região e o nono consumidor de energia no mundo segundo o *Ranking Mundial de Energia e Socioeconomía* em 2012 e que apresenta atualmente uma matriz energética baseada no petróleo e fontes renováveis bem consolidadas. Segundo estatísticas apresentadas no informe *Balanço Energético Brasileiro 2015* da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energias do Brasil, a matriz energética do país se encontra formada em um 39.4% por petróleo e derivados, 15.7% por biomassa, 13.5% por gás natural, 11.5% por fontes hidráulicas (que geram a maioria da energia elétrica do país), 8.1% por madeira e carvão vegetal, 5.7% por carvão mineral, 4.7% por outros tipos

de energia renováveis, 1.3% por urânio e 0.6% por outras fontes não renováveis (Empresa de Pesquisa Energética, 2015).

O país, ainda com uma grande matriz energética, demonstra que a falta de estrutura não é o único que garante preços confortáveis sobre o usuário. Estatísticas divulgadas nos últimos 10 anos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Federação das Indústrias do Rio de Janeiro (FIRJAN), provam que o Brasil também conta com um dos preços da energia elétrica mais custosa do mundo, logrando tarifas médias de energia elétrica sobre passam os R\$300 MW/h para o uso residencial e industrial.

Devido a isso, o Brasil cada vez é forçado a enfrentar a problemática da estabilização dos preços energéticos por meio da modificação da oferta com tecnologias sustentáveis. A energia geotérmica superficial e o aproveitamento das estruturas de fundação, assim como na Europa, é uma opção amigável e economicamente viável com o meio ambiente, que adicionalmente, da abertura à utilização de novas tecnologias energéticas no país Brasileiro e a região de América Latina. Utilizar a técnica de bombas geotérmicas que funcionam com sistemas de tubulações diminui os custos operacionais de processos não só de climatização nos prédios, sem não também, de processos ligados ao aquecimento e esfriamento industrial utilizando em menor proporção a eletricidade como fonte de energia.

Finalmente, na presente dissertação se apresenta um desenvolvimento numérico relacionado ao potencial de utilização de Estacas de Energia no Brasil. O trabalho contém o estudo numérico que compete à análise paramétrica de um ensaio de resposta térmica para um sistema de estaca trocadora de calor. O estudo apresenta conteúdo complementar ao trabalho de pesquisa do estudante *Luis Antonio Bandeira Neto* da Universidade de São Paulo EESC titulado *Estudo da Resposta Térmica de Fundações por Estacas Trocadoras de Calor em Solo não Saturado, em Região de Clima Subtropical* orientado pela professora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. Esta pesquisa avalia o comportamento térmico de estacas de energia utilizado os resultados experimentais para validar resultados numéricos e realizar simulações paralelas ao modelo original mudando parâmetros geométricos, de configuração, hidráulicos e térmicos so sistema. Desta forma, são determinadas as condições ótimas de funcionamento e do sistema em um ambiente subtropical do Brasil devido à análise da sensibilidade em variáveis que interatuam no teste implementado o software baseado nos métodos numéricos COMSOL Multiphysics.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Analisar o comportamento térmico de uma estaca trocadora de calor por meio da validação numérica da resposta térmica em um solo tropical e a posterior avaliação de parâmetros que influem na eficiência dela.

Para desenvolver este objetivo geral, se tem basicamente 4 objetivos específicos:

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar por meio dos modelos semi-empíricos as variáveis térmicas de capacidade térmica específica e condutividade térmica das camadas de solo.
- Realizar uma análise de sensibilidade do modelo variando parâmetros geométricos que copõem o domínio de solo.
- Determinar o espaçamento ótimo entre duas estacas trocadoras de calor com as mesmas características para se atingir um desempenho térmico ótimo do sistema.
- Simular por meio do software COMSOL o sistema de estaca de energia, analisar a resposta térmica do sistema e a incidência térmica no solo.
- Analisar numericamente a variação e sensibilidade dos resultados de desempenho do sistema com a mudança de parâmetros geométricos, térmicos, hidráulicos do ensaio TRT (simulação paramétrica).

## **1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

A fim de abordar os objetivos traçados na presente dissertação, basicamente a dissertação se divide em 6 Capítulos principais: Entendimento do problema, Revisão bibliográfica, Modelagem e resultados de ensaios TRT, Modelagem e resultados da análise paramétrica de uma estaca de energia e finalmente conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

O primeiro capítulo da dissertação se compõe de uma introdução do tema de estacas trocadoras de calor. Dentro de esta introdução, se explica o contexto do objeto de estudo, os objetivos traçados na presente dissertação, como também o escopo do trabalho.

No segundo capítulo se realiza uma breve descrição dos conceitos que dão lugar ao entendimento do problema como é o fenômeno de transferência de calor. Também descrevem as propriedades térmicas e valores dos materiais que compõem o sistema de estaca de energia.

O terceiro capítulo, focado na revisão bibliográfica, se comenta brevemente a recompilação bibliográfica mais atualizada sobre o estado do mercado dos sistemas de bombas térmica que tem como fonte de calor o solo (GSHP) e também a descrição dos trabalhos mais importantes que se aportaram ao campo das análises paramétricas de estacas de energia. Também, são descritas as formulações relacionadas ao fenômeno de transferência de calor em um sistema de estaca e se realiza o reconhecimento do Teste de Resposta Térmica (TRT) e os componentes que formam o ensaio. Finalmente, se comenta o estado do uso da energia geotérmica no Brasil e os casos de estudo de ensaios TRT realizados no país.

No quarto capítulo, se comenta de modo geral as características e descrição do ensaio TRT realizado em São Carlos. Se descrevem as características do lugar de ensaio, se comenta a informação da geologia e perfil de solo, climatologia e mineralogia. São calculados por meio de formulações semi-empíricas os parâmetros térmicos de condutividade e capacidade térmica dos materiais que formam o solo

No quinto capítulo, analisa-se numericamente o caso particular de um ensaio TRT realizado no campo experimental na Universidade de São Paulo EESC. Analisa-se a sensibilidade dos parâmetros que se relacionam ao domínio de solo e os elementos finitos. e simula-se por meio do software COMSOL Multiphysics os modelos numéricos e do problema real. Com os resultados, se valida a resposta térmica da estaca trocadora de calor por meio dos resultados experimentais. Realiza-se também a análise paramétrica de uma estaca de energia composta por 76 modelos de ensaio TRT onde se variam parâmetros térmicos, hidráulicos, de configuração e geométricos que fazem parte do sistema de estaca de energia em condições ensaiadas em campo. Finalmente, se realiza uma análise da resposta térmica com relação ao espaçamento entre duas estacas.

Finalmente no sexto capítulo se comentam brevemente as conclusões e recomendações dadas a partir dos resultados obtidos tanto da validação dos resultados como da análise da análise paramétrica.

O anteriormente descrito se resume no fluxograma apresentado na Figura 1.1 que explica a metodologia da dissertação.

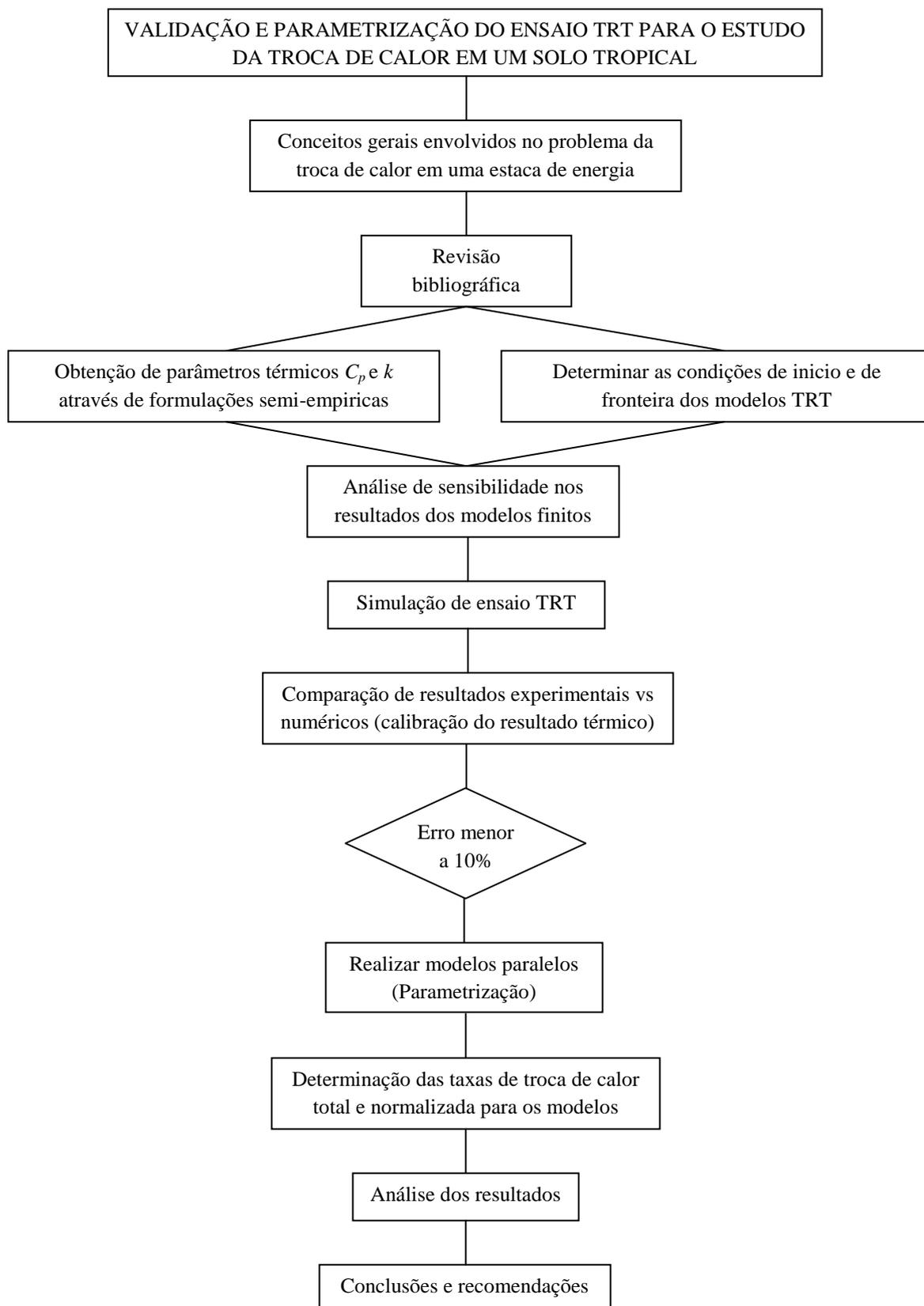


Figura 1.1 - Processos da dissertação.

---

## **2. CONCEITOS GERAIS DO PROBLEMA**

A mecânica dos solos e rochas tem aportado na determinação de soluções geotécnicas. A implementação de soluções aproximadas em fenômenos complexos da engenharia geotécnica dá como resultado um entendimento físico e econômico dos projetos que se traçam dentro da engenharia civil.

Atualmente os avanços da engenharia geotécnica em países tropicais apontam ao estudo do comportamento dos solos tradicionalmente não estudados. Regiões como África, Ásia e a maioria dos países do continente Americano, considerados países com solos tropicais, se encontram estudando e desenvolvendo soluções aos problemas geotécnicos tentando entender o comportamento destes solos ante as distintas solicitações.

Em seguida serão tratados alguns tópicos bases do problema térmico de transferência de calor entre estaca e solo, apresenta-se informação que dará passo ao entendimento do significado das variáveis e parâmetros que se envolvem no problema. Além disso, também se informa sobre as ferramentas para a análise do fenômeno e as hipóteses que se assumem para o desenvolvimento da dissertação.

### **2.1. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO TÉRMICO EM REGIÕES TROPICAIS**

Os sistemas de troca de calor por meio de estruturas que interatuam com o solo têm sido estudados principalmente em países como Áustria, Suíça, Irlanda, entre outros países que situados em zonas não tropicais. Eles apresentam condições térmicas e ambientais que desenham um panorama geotérmico distinto ao apresentado em zonas tropicais. Um exemplo claro é o contexto Brasileiro que se localiza na zona tropical e temperada do hemisfério sul, que conta com diversos climas como são o equatorial, tropical, semiárido, temperado e subtropical. Isto implica uma análise particular do comportamento térmico em solos não tradicionais que ajuda na determinação de novos espaços para o funcionamento de sistemas geotérmicos acoplados ao solo.

Além do clima, o Brasil também se destaca geotecnicamente pelas variadas condições do solo devido aos processos etimológicos. Para este caso, são nomeados os principais tipos de solos estudados no Brasil: os solos residuais (lateríticos ou saprolíticos), produto do intemperismo físico-químico, e os solos transportados, produto dos diferentes agentes transportadores (água, vento, gravidade, etc).

Em solos lateríticos (especialmente em solos lateríticos arenosos) são visíveis teores de ferro e alumina, e em solos saprolíticos (derivados de rochas sedimentares), minerais termicamente importantes como o quartzo e a sílica, que são altamente chamativos para projetos térmicos como sistemas trocadores de calor devido aos valores de condutividade e capacidade térmica altamente importante que podem desenvolver nestes projetos.

Solos porosos também são apresentados na região brasileira, e apresentam desvantagens frente solos estruturalmente bem constituídos devido aos altos índices de vazios que podem ter. Isto diminui a capacidade e condutividade térmica do solo permitindo a possível inviabilidade dos projetos de sistemas trocadores de calor. São essas características particulares dos solos tropicais que distinguem o comportamento geotérmico em regiões tropicais e regiões não tropicais altamente estudadas.

## **2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR**

O fenômeno de transferência de calor se pode apresentar de 3 maneiras distintas, 2 delas relacionadas o tema de estacas trocadoras de calor. Basicamente a mudança da temperatura se manifesta como a mudança da energia cinética molecular devido à transferência de calor, mas essa mudança de temperatura pode se apresentar por diferentes processos de transferência de calor:

- Transferência de calor por condução: é a forma de transferir calor devido à diferença de temperatura em um ou vários sólidos em contato. Para o caso de uma estaca de energia o processo de transferência de calor se pode apresentar no solo, a estaca e o contato entre o solo e estaca.
- Transferência de calor por convecção: é forma de transportar calor em um fluido (líquidos ou gases) devido às diferenças de temperaturas. Em uma estaca trocadora de calor, este fenômeno se apresenta no fluxo de água que passa pela tubulação, que depende em maior parte da variação da temperatura que experimenta a parede da tubulação.
- Transferência de calor por radiação: este processo de transferência de calor se pode atribuir às mudanças nas configurações elétricas moleculares e atômicas devido às ondas eletromagnéticas ou fótons. Dentro da análise do sistema de estaca de energia este tipo de transferência de calor se apresenta na superfície do solo, que com a

exposição ao sol, recebe diretamente as ondas eletromagnéticas, que mudam a temperatura do solo.

Nesta dissertação se simulam dois processos de transferência de calor, onde o processo de radiação não se leva em conta, pois o processo superficial de transferência de calor por parte dos raios do sol, se representada como condição de fronteira simulando a mudança de temperatura na superfície do modelo com o tempo.

### **2.3. ENTRENDIMENTO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SOLO.**

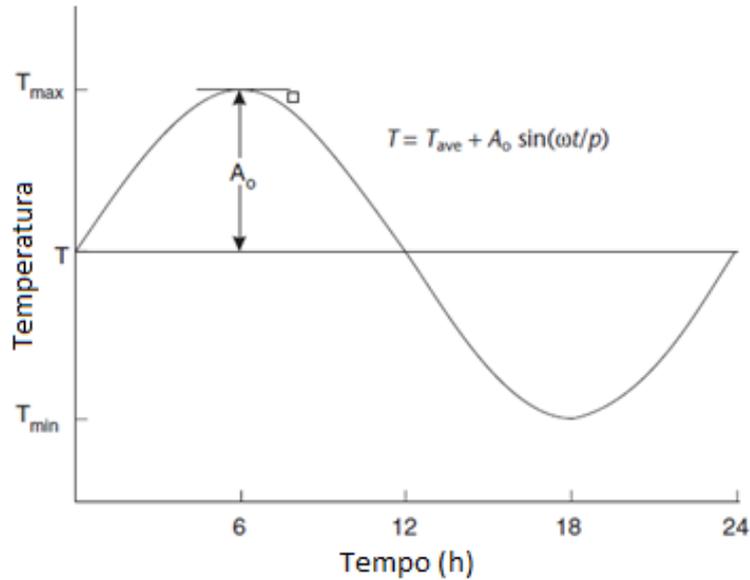
O solo é considerado uma fonte de energia devido à capacidade de concentrar energia térmica. O solo é considerado como acumulador de energia devido que à constantemente interação térmica que tem com o ambiente e fontes de calor profundo. Essa interação térmica ocasiona de maneira significativa uma concentração de energia nos materiais que compõem o solo, gerando-se assim fluxo de calor.

A temperatura superficial do solo varia continuamente em resposta as condições atmosféricas, que depende em maior parte da variação térmica do dia e da noite, e também, das temporadas climáticas ao longo do ano. Registram-se alterações da temperatura superficial devido a acontecimentos tais como nebulosidade, chuva ou tempestades de neve, e períodos secos. Adicionalmente, também se visa a mudança nas condições de temperatura devido a influências externas como refletividade, condições topográficas, cobertura vegetal.

Na presente dissertação, uma das condições de fronteira do problema da transferência de calor está relacionada com a temperatura ambiente. Normalmente a temperatura da capa superficial do solo tem temperaturas perto da temperatura ambiente devido á constante radiação do sol e contrato com a atmosfera. Ignorando as causas de perturbação térmica na superfície como árvores e prédios, a parte superior do solo teria um comportamento quase constante cada ano. Existem funções que descrevem a temperatura ambiente ao longo do ano as quais se relacionam matematicamente com uma função senoidal a traves do tempo tal como se observar na Figura 2.1.

Embora exista uma variação da temperatura a nível superficial, dependendo das propriedades térmicas do solo, este não experimenta maior variação da temperatura ao longo do ano desde certa profundidade característica. Analisando o perfil de temperatura desde um nível macro, essa profundidade característica pode variar entre os 5 a 10 metros de

profundidade tal como se mostra no exemplo da Figura 2.2. É pelo anterior que a temperatura a partir dessa profundidade característica se pode considerar constante já que existem poucas variações térmicas (Bidarmaghz, Narcilio, & Johnston, 2013).



Onde  $T_{ave}$  é a temperatura média diária,  $A_o$  amplitude na superfície  $(T_{max}-T_{min})/2$ ,  $\omega$  frequência  $2\pi$ , e finalmente,  $p$  o período 24h ou 86400s.

Figura 2.1 - Variação geral da temperatura na superfície do solo. (Hillel, 1998)

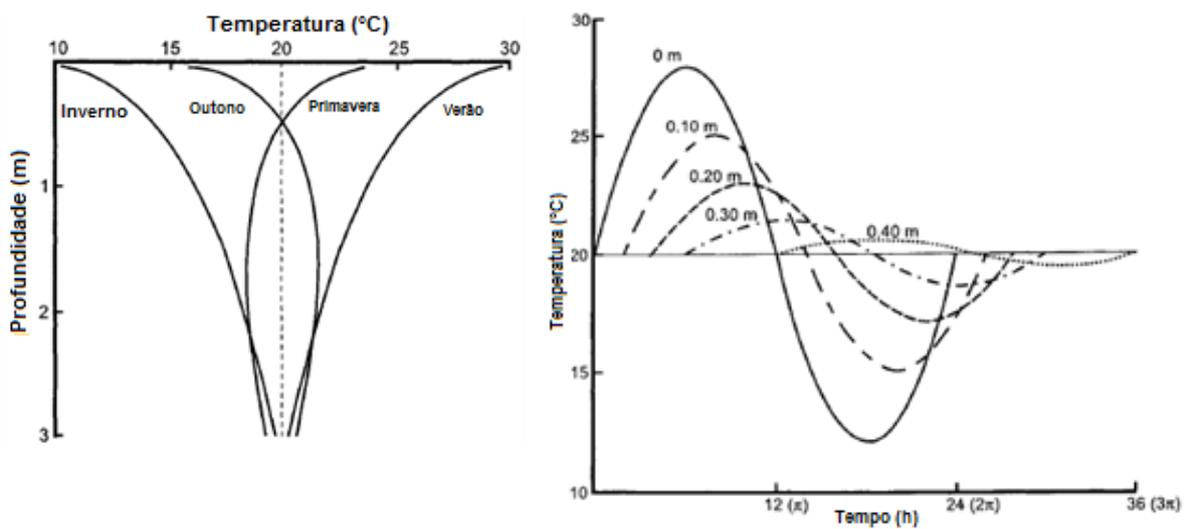


Figura 2.2 - Flutuação da temperatura do solo com a profundidade. (Hillel, 1998)

## 2.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Para problemas de transferencia de calor é necessário definir os parâmetros térmicos que descrevem o comportamento térmico dos materiais. A condutividade e a capacidade calorífica específica dos solos são propriedades que utilizam-se para determinar o comportamento da transferencia de calor em um meio por meio da difusividade térmica. A partir deles se podem determinar variáveis como por exemplo são os coeficientes de transferencia de calor e a difusividade térmica, os quais que são importantes na interpretação dos efeitos térmico.

Na Tabela 2.1 se mostram alguns valores gerais da condutividade térmica e capacidade calorífica (volumétrica) em diferentes tipo de solos.

Tabela 2.1 - Valores gerais das propriedades térmicas em diferentes tipos de solos de acordo à normativa Alemã para propósitos geotérmicos (VDI 4640)

Tipo de Solo	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutividade térmica [W/mK]	Capacidade térmica volumétrica* [J/m <sup>3</sup> K <sup>1</sup> ]
Cascalho (seco)	2700-2800	2.5 - 4.0	1.4-1.6
Cascalho (saturado)	~2700	~1.6	~2.4
Morena	-	1.0 - 2.5	1.5-2.5
Areia (seca)	2600-2700	0.3 - 0.8	1.3-1.6
Areia (saturada)	2600-2700	1.7 - 5.0	2.2-2.9
Argila/silte (seco)	-	0.4 - 1.0	1.5-1.6
Argila/silte (saturado)	-	0.9 - 2.3	1.6-3.4
Orgânico	-	0.2 - 0.7	0.5-3.8

\*Capacidade térmica específica de solos depende da densidade de cada material avaliado e é calculada com a relação entre a a Capacidade térmica volumétrica e a densidade do solo

### 2.4.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica ( $k$  ou  $\lambda$ ) é um conceito bem importante na análise da transferência de calor entre sólidos. Está definida como uma propriedade física que mede a capacidade de transmitir calor ou energia entre as moléculas que compõem as partículas do solo e está definida pela Eq. (1).

$$k = -\frac{\dot{Q}}{\nabla T} \quad (1)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a densidade fluxo de calor em uma área determinada e  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura para cada direção de análise.

De modo geral, a condutividade térmica dos solos varia dependendo da composição química e mineralógica, a temperatura do solo e a porosidade. A condutividade térmica tem uma relação inversamente proporcional à porosidade do solo. Quando o material é poroso, existe menor contato superficial entre partículas do solo, que como consequência, diminui a condutividade térmica, mas se os vazios diminuïrem, o contato entre partículas seria maior visando assim o aumento da condutividade térmica. Do mesmo modo o solo pode aumentar a condutividade térmica dependendo do material de enchimento nos poros. Um material saturado teria maior condutividade térmica devido à maior condutividade da água com relação ao ar.

Nesse mesmo sentido, mineralogicamente também existe certa dependência no resultado da propriedade. Solos que apresentam teores relativamente altos de minerais como quartzo, a olivina, o piroxênio e anfíbolitos, tem como resultado uma condutividade relativamente alta. O quartzo é o mineral que mais condutividade térmica aporta ao solo. Porém, quando se apresentam altas quantidades deste mineral pode se tornar em um problema devido ao fato de que existe um incremento indesejável na condutividade térmica que diminui a eficiência de transferência de calor das interações com a estaca de energia (Moel, 2010).

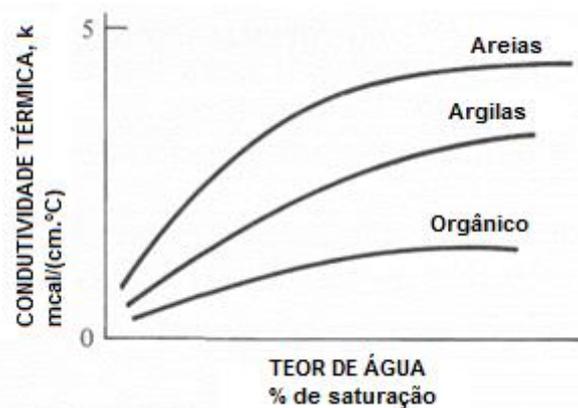


Figura 2.3 - Variação geral da condutividade térmica com a saturação em solos arenosos, argilosos e orgânicos. (Hillel, 1998)

#### 2.4.2. Capacidade térmica específica

A capacidade térmica ( $C$ ) é uma propriedade térmica dos materiais que descreve a quantidade de calor fornecida com a variação de temperatura que o corpo experimenta. O conceito de capacidade térmica específica ( $C_p$ ) refere-se à capacidade térmica pela unidade de massa da substância e se determina de acordo à Eq. (2). A capacidade térmica específica depende essencialmente do tipo de material que constitui a massa.

$$C_p = \frac{q}{m \Delta T} \quad (2)$$

Onde  $q$  é o calor medido,  $m$  massa do meio e  $T$  temperatura experimentada.

Na geotecnia a capacidade térmica específica dos solos é determinante para saber o nível de troca de calor que existe entre as estruturas que interatuam com o solo como, por exemplo, são as fundações. Neste caso particular, a propriedade é importante para determinar o potencial de calor que os materiais têm para trocar.

A capacidade térmica específica dos solos depende diretamente das fases que compõem o solo, os minerais constituintes, a densidade volumétrica aparente (*bulk density*) e o teor de sólidos, gases e os fluidos que preenchem os poros. Desta forma, o conteúdo de umidade no solo é uma das variáveis que tem maior influência na mudança da propriedade (Hillel, 1998). Na Figura 2.4, se ilustra o comportamento geral da capacidade calorífica específica devido ao conteúdo de água em solos. De forma geral o gráfico ilustra a proporcionalidade que existe de forma direta ao conteúdo de água no solo. Mineralogicamente, um aumento da capacidade térmica específica também se relaciona ao maior conteúdo de material orgânico e quartzo presente no solo.

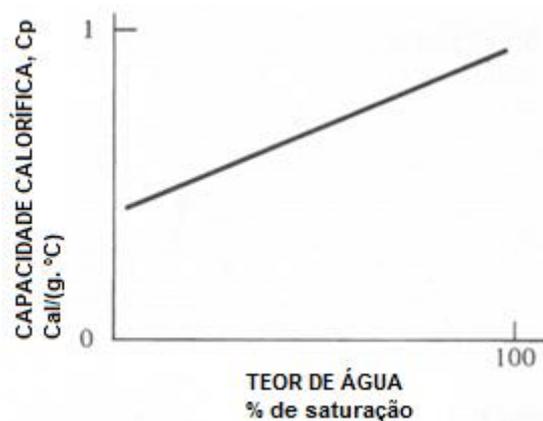


Figura 2.4 - Variação geral da capacidade térmica especificados solos com a saturação (Hillel, 1998)

### 2.4.3. Difusividade térmica

A difusividade térmica de um material é uma propriedade térmica também de relevância ao desenvolver problemas de transferência de calor entre diferentes meios. A propriedade descreve a capacidade de um material para conduzir energia em relação à disposição para armazenar energia térmica. De certa forma, a difusividade térmica é a medida da inércia térmica, e se determina numericamente mediante a derivação da equação

termodinâmica de condução de calor Eq. (3). Assim, a difusividade térmica alta em um material significa que o calor se move rapidamente através de uma seção de material devido que o meio conduz energia térmica rapidamente em relação à sua capacidade térmica e densidade aparente.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

Onde  $\alpha$  é a difusividade térmica,  $k$  a condutividade térmica,  $\rho$  densidade aparente e  $C_p$  é capacidade térmica específica do material.

## 2.5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

No fenômeno de transferência de calor relacionado a sistemas de trocadores de calor se precisam analisar as propriedades térmicas de cada um dos materiais que compõem em parte as diferentes estruturas. A transferência de calor entre o solo e o fluxo refrigerante tem como intermediários térmicos o concreto e o polietileno de alta densidade (HDPE). Em seguida, são descritas as características e propriedades térmicas de cada material.

### 2.5.1. Fluidos refrigerantes e aditivos

O fluido que passa pelo sistema da tubulação está composto por água ou também da mistura água-refrigerante (glycol) ou também de solução salina (Brandl, 2006). Neste caso, as misturas são realizadas para dar melhores propriedades térmicas ao fluxo, convenientes para o funcionamento do sistema. Na maioria das vezes, também são adicionados aditivos/adições para evitar a corrosão de válvulas e demais peças do sistema, ou também, como agentes que mudam propriedades térmicas como o ponto de ebulição da água. No caso de uma mistura Glycol-água de 50-50, o líquido pode atingir uma capacidade calor específica de 3.140 J/kg.°C. Segundo Brandl (2006), a mistura Glycol-água têm-se mostrado mais adequada para ter bons resultados no comportamento térmico do fluxo.

Um dos parâmetros que influi nos resultados térmicos do sistema de estaca de energia é velocidade do fluxo dentro das tubulações. Quando o fluido começa movimentar-se devido ao funcionamento da bomba, este começa ter mudanças na temperatura inicial devido à velocidade que se adquire com o tempo e as condições de temperatura nas paredes da tubulação durante o escoamento. É basicamente com a estrutura da estaca trocadora de calor que se procura a mudança de temperatura mediante o fluxo refrigerante: existe uma troca de calor entre o líquido e a parede da tubulação, que dependendo das condições iniciais de

temperatura do solo e a temperatura induzida ao líquido, pode ser maior ou menor na saída da estaca. Logo de sair da estrutura de concreto, o fluido é conduzido a uma bomba de calor onde sofre novas mudanças térmicas complementárias ao processo térmico na estaca, para se chegar assim à temperatura desejável pelo usuário.

### 2.5.2. Concreto

O concreto habitualmente utilizado para a construção de estruturas como estacas é considerado como material de condutividade térmica baixa ou isolante térmico, mas também, como um material com boa capacidade térmica. A condutividade térmica do concreto depende principalmente de fatores como a litologia do agregado, o peso específico dos agregados, umidade e a relação água/cimento (Wadsö, Karlsson, & Tammo, 2012). Este tipo de material tem pouca condutividade térmica já que o material de cimentação contém um alto grau de minerais calcários, caracterizados também por a baixa condutividade térmica. Por este motivo, em alguns casos são realizadas misturas de concreto com agregados de alto conteúdo de quartzo. Normas Europeias como a *GSHP Association*, na Grã Bretanha, não permitem desenhos de projetos de estacas de energia com valores maior a 1.5 W/m.K já que para alcançar valores mais altos se precisa de adições especiais (p.e sílica).

Na Tabela 2.2 são mostrados os valores de projeto das propriedades térmicas do concreto que a Organização Internacional de Estandardização (ISSO) propõe para as diferentes finalidades de projeto.

Tabela 2.2 - Valores gerais das propriedades térmicas dos diferentes tipos de concretos. ISO/FDIS 10456:2007(E). (ISO, 2007)

Material	Densidade $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Condutividade Térmica $\lambda$ W/m.K	Capacidade de Calor específico $C_p$ J/kg.K
	1800	1.15	1000
Densidade Média	2000	1.35	1000
	2200	1.65	1000
Alta densidade	2400	2.00	1000
Reforçado (com 1% de aço)	2300	2.30	1000
Reforçado (com 2% de aço)	2400	2.50	1000

Embora este material seja termicamente pouco condutivo, a vantagem que se apresenta é a boa capacidade térmica que permite armazenar calor durante um período de tempo

relativamente longo (Brandl, 2006). Por isto, o concreto funciona como um material perfeito para o nível de troca de calor que o sistema precisa.

### 2.5.3. Tubulação

As tubulações comumente utilizadas para este tipo de sistemas são fabricadas a partir de materiais poliméricos. Segundo a *GSHP Association*, geralmente são utilizadas tubulações de polietileno de alta densidade (HDPE) caracterizadas pela flexibilidade, alta deformabilidade e durabilidade. O diâmetro da tubulação deve ser o suficiente grande para manter a potencia do bombeamento pequeno, mas suficientemente pequeno como para provocar escoamentos turbulentos e garantir condições de transferência de calor entre o fluido circulante e a parede interior da tubulação. Portanto, os diâmetros externos de tubulação mais usuais nestes sistemas estão entre os 20 mm e 90 mm, e espessuras entre 1.80 mm até 10 mm (GSHPA, 2012).

Os materiais poliméricos são considerados materiais de pouca condutividade térmica e de capacidade específica de calor alta. Estas características ajudam termicamente devido à compatibilidade dos materiais que formam o sistema. De acordo às normativas internacionais, mostradas na Tabela 2.3, os valores gerais das propriedades térmicas de cada tipo de material polimérico usado para tubulações em estacas de energia dependem da procedência e a fabricação deles. No presente estudo são considerados tubulações de Polietileno de alta densidade HDPE.

Tabela 2.3 - Valores gerais utilizados para as diferentes propriedades térmicas em plásticos. ISO/FDIS 10456:2007(E).(ISO, 2007)

Material	Densidade $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Condutividade Térmica $\lambda$ W/m.K	Capacidade de Calor específico $C_p$ J/kg.K
Cloreto de polivinilo (PVC)	1390	0.17	900
Polipropileno/polietileno alta densidade	980	0.50	1800
Polipropileno/polietileno baixa densidade	920	0.33	2200
Polipropileno	910	0.22	1800
Polipropileno com 25 % fibra de vidro	1200	0.25	1800

## 2.6. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM ESTACAS DE ENERGIA

A troca de calor entre meios (solo-estaca-tubulação-fluido) pode ser medida a partir da energia que sai de um ponto específico até um ponto final. Neste caso, a energia é medida nos pontos de entrada e saída do fluido à estaca. Ao determinar a mudança de temperatura que experimenta o fluido em determinado tempo, se experimenta também uma mudança de energia no fluido. Por esta razão, a eficiência das estacas de energia se mede determinando a taxa de energia transferida ou fluxo de calor que o sistema consegue através da diferença de temperatura do fluido nos dois pontos de interesse.

Para estacas de energia, a troca de calor pode ser referida ou relacionada como fluxo de calor ou efetividade térmica do sistema. O fluxo de calor se pode dar de uma forma total ou resumida a um valor normalizado geralmente pelo comprimento de estaca. Este significado, também se pode nomear como efetividade ou transferência da estaca por unidade de tempo e comprimento. Também, pode-se usar o resultado como uma taxa de calor trocado (total ou normalizada).

Assim, eficiência térmica da estaca de energia é determinada a partir do fluxo de calor trocado por comprimento de estaca de acordo com a formulação:

$$Q_T = c_w \rho_w q_{\text{entrada}} \left( \frac{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}}{L_e} \right) \quad (4)$$

Onde  $c_w$  é a capacidade térmica específica da água,  $\rho_w$  a densidade da água,  $q_{\text{entrada}}$  a vazão,  $T_{\text{entrada}}$  e  $T_{\text{saída}}$  são as temperaturas de entrada e saída no sistema trocador de calor e  $L_e$  o comprimento da estaca.

## 2.7. METODOS NUMÉRICOS

Para resolver o problema da troca de calor entre todos os elementos do sistema é necessário de métodos que possam vincular os diferentes fenômenos e materiais que existem no fenômeno de troca de calor. Neste caso, para realizar esse acoplamento dos processos térmicos e analisar as variáveis térmicas no espaço, é complicado obter resultados através de métodos não computacionais. Devido a isto, é necessário ferramentas avançadas que ajudem a obter respostas rápidas com resultados de boa aproximação.

### 2.7.1. COMSOL Multiphysics v 5.1

COMSOL Multiphysics é um software de diferentes plataformas baseadas nos métodos numéricos avançados que servem como ferramenta para solucionar problemas físicos

e multifásicos por meio dos elementos 1D, 2D e 3D. Adicionalmente, o software pode expandir uma plataforma de simulação com interfaces físicas e ferramentas para aplicações de diferentes problemas elétricos, magnéticos, mecânicos, químicos, entre outros.

Para este caso particular, o problema de transferência de calor e acoplamento dos fenômenos físicos se resolve o problema utilizando as plataformas de transferência de calor (*Heat Transfer Module*) e análise não isotérmica de tubulações (*Pipe Flow Module*). Dentro da análise de transferência de calor, o software dá opções de análise de troca de calor entre sólidos, fluxos e sistemas multifásicos. Também, se consegue realizar a análise do fluxo não isotérmico conseguido com modelos assumindo que o fluido (água) é incompressível e que existe uma gradiente de temperatura não constante no tempo.

#### **2.7.1.1. Módulo *Pipe flow***

O módulo *Pipe Flow* é utilizado para realizar simulações de escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, transitórios hidráulicos e acústicos em redes de tubos e canais. O módulo pode ser integrado com qualquer outro módulo dos produtos da COMSOL para modelar tubulações que têm efeitos em entidades maiores tais como tubulações de refrigeração de máquinas em blocos ou canais de alimentação e canais de produtos ligados a pequenas tubulações. O módulo fornece finalmente velocidade, pressão, concentração de materiais e distribuições de temperatura ao longo das tubulações e canais, mas também pode simular a propagação de ondas acústicas e o efeito de martelo.

O módulo *Pipe Flow* é adequado para a modelagem de fluxo incompressível em tubulações e canais cujos comprimentos são grandes o suficientes para que o fluxo possa ser considerado plenamente desenvolvido. Com esta hipótese, utiliza elementos lineares, resolvendo para a secção transversal média a velocidade tangencial ao longo das arestas, para evitar uma simulação da secção transversal da tubulação com uma malha 3D. Isto significa que as variáveis são modeladas em média nas secções transversais da tubulação e variam apenas ao longo do comprimento da tubulação. Fornecem-se fatores de atrito de Darcy para cobrir o regime de fluxo inteiro, incluindo fluxo laminar e turbulento, fluidos newtonianos e não newtonianos diferentes ou geometrias da secção, e uma gama de valores de rugosidade superficial relativa da tubulação. Estes podem variar de acordo com sua posição na rede, ou diretamente relacionada com as variáveis que o usuário modela.

### 2.7.1.2. Módulo *Heat Transfer*

O módulo *Heat Transfer* em sólidos utiliza-se para investigar os efeitos de aquecimento e resfriamento em substâncias, componentes ou processos. O módulo oferece ferramentas de simulação para estudar mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação para problemas mecânicos estruturais, dinâmica dos fluidos, eletromagnetismo e reações químicas. O módulo atua como uma plataforma para aplicações possíveis de transferência de calor ou energia entre substâncias sólidas, líquidas e gasosas.

O módulo também inclui um banco de dados de materiais que contém as propriedades de diversos fluidos e gases comuns, o que inclui muitos dos dados termodinâmicos necessários para uma análise precisa. Eles incluem condutividade térmica, capacidade térmica e densidade. Além disso, podem-se criar materiais com variáveis não incluídas nesta base de dados. Esta ferramenta é uma fonte para propriedades de material, com mais de 2.500 materiais sólidos, onde muitas delas estão descritas em função da temperatura.

Finalmente, o módulo *Heat Transfer* também possui interfaces robustas para modelar a transferência de calor em meios porosos, considerando a condução e a convecção, nas fases sólidas e nos poros abertos da matriz porosa. Podem-se selecionar diferentes modelos de médios para definir propriedades de transferência de calor eficazes que são automaticamente calculadas a partir das respectivas propriedades dos materiais sólidos e fluidos. Pode-se também acessar a um recurso predefinido para a dispersão de calor em meios porosos causada pela via tortuosa percorrida pelos fluidos através dos poros.

### 2.7.2. Hipóteses do problema

Para desenvolver a dissertação numérica, são consideradas hipóteses que fundamentam o desenvolvimento do fenômeno e a escolha dos módulos *Heat transfer* e *Pipe flow* do software COMSOL Multiphysics. Embora existam opções de realizar uma análise detalhada com estes módulos, se consideram as seguintes hipóteses na análise:

- O diâmetro da tubulação é relativamente pequeno com relação ao diâmetro da estaca, portanto a relação do diâmetro da estaca e o comprimento da estaca é bem pequeno.
- O anterior permite considerar uma análise unidimensional do fluxo (perpendicular à secção da tubulação) e poucas variações da temperatura entre os pontos que conformam uma mesma seção em qualquer profundidade da tubulação. Por esta razão

é assumida uma temperatura constante ao longo de todas as seções transversais (a média da temperatura de todos os pontos da área) da tubulação.

- O ar é meio que transfere o calor entre o ambiente e os domínios de concreto.
- O calor superficial transferido para os domínios de solo e concreto se dá por meio de uma camada de ar.
- Radiação entre grãos e fluidos dentro do solo são desprezíveis em comparação com os níveis de troca de calor dados durante a troca de calor solo-estaca.
- A temperatura inicial do fluido e concreto depende da temperatura do solo.
- A variação da condutividade térmica no solo não está ligada à variação de umidade do solo durante o ensaio.
- Considera-se saturação do solo constante no tempo.
- Densidade, capacidade térmica e condutividade térmica dos materiais do solo não mudam com a temperatura. Consideram-se valores médios registrados na literatura.
- Densidade, condutividade e capacidade térmica do fluido (água) são constantes no tempo, consideram-se  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $k=0.6 \text{ W/m.K}$  e  $C_p= 4180 \text{ J/kg.K}$ .
- Condutividade térmica e capacidade específica do concreto são valores médios tomados da literatura.  $k=2.0 \text{ W/m.K}$  e  $C_p=2400 \text{ J/kg.K}$
- Viscosidade do fluido é constante com a mudança de temperatura.
- Fluido circundante (água) considerado como incompressível.
- Densidade e peso específico do solo são constantes ao longo da profundidade de cada camada de solo e tempo.

---

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. SISTEMAS GEOTÉRMICOS COM BOMBAS DE CALOR (GSHP)

Os sistemas geotérmicos com bombas de calor (*Ground Source Heat Pump*) conhecidos pelas siglas GSHP, são sistemas termo ativos que aproveitam a energia em forma de calor que está armazenada no solo para aclimatização de prédios. Compõem-se de dois circuitos e uma bomba de calor. O circuito primário que interatua de forma indireta ou direta com o solo está constituído por uma tubulação que pode estar incorporada em elementos de fundação ou em contato com água ou concreto (sistemas indiretos), ou também em contato direto com o solo (sistemas diretos). O segundo circuito desempenha a função de esfriar ou esquentar o ambiente dentro da edificação e se localiza incorporado nas paredes, lajes, plataformas, etc., da estrutura. Todo este sistema de tubulações é conectado a uma bomba de calor (*Heat Pump*), que permite controlar de maneira significativa a temperatura desejada dentro do prédio (Brandl, 2006).

O circuito de tubulações se configura dependendo do tipo de sistema com que se vai trabalhar. São considerados dois tipos de sistemas geotérmicos GSHP de acordo aos circuitos: sistemas trocadores abertos e sistemas trocadores fechados. O sistema aberto consiste em conduzir o fluxo atuante desde/até um aquífero. O sistema fechado conduz o fluxo desde/até o solo de forma continua formando uma circulação de fluxo repetitiva. Este último sistema pode-se dividir em dois tipos: sistemas horizontais e sistemas verticais. Os sistemas trocadores de calor horizontais estão localizados perto da superfície e precisam de um grande volume de tubulação e espaço. Os sistemas verticais são profundos e podem ter os trocadores de calor incorporados em estruturas de concreto, ilustrados na Figura 3.1. (Park, Lee, & Choi, 2012)

Portanto, os sistemas trocadores de calor estão classificados em cinco categorias principais segundo o Brandl (2008), eles são:

1. Circuitos abertos (extração/recarga): são sistemas fornecidos por água de lagos, lagoa e poços, consiste em ter uma fonte de extração de água e outra de re-injeção formando um circuito aberto.
2. Circuito de lagoa: é um sistema fechado que está configurado com tubulações helicoidais colocados dentro de uma lagoa.

3. Estacas de energia ou estacas trocadoras de calor (*Energy Piles/ Pile Heat Exchanger System*): são estruturas de fundação equipadas com tubulações cada uma com entrada e saída, as quais estão ligadas a uma bomba de calor formando um circuito fechado.
4. Circuito horizontal: consiste em um circuito fechado de tubulações posicionadas de forma horizontal. O sistema é muito comum em áreas rurais e precisa-se de muito espaço.
5. Sistema fechado de poços: consistem em uma tubulação instalada verticalmente dentro de um poço pre-escavado (preenchido com água ou concreto). Comumente realizado em lugares onde não é possível construir circuitos horizontais.

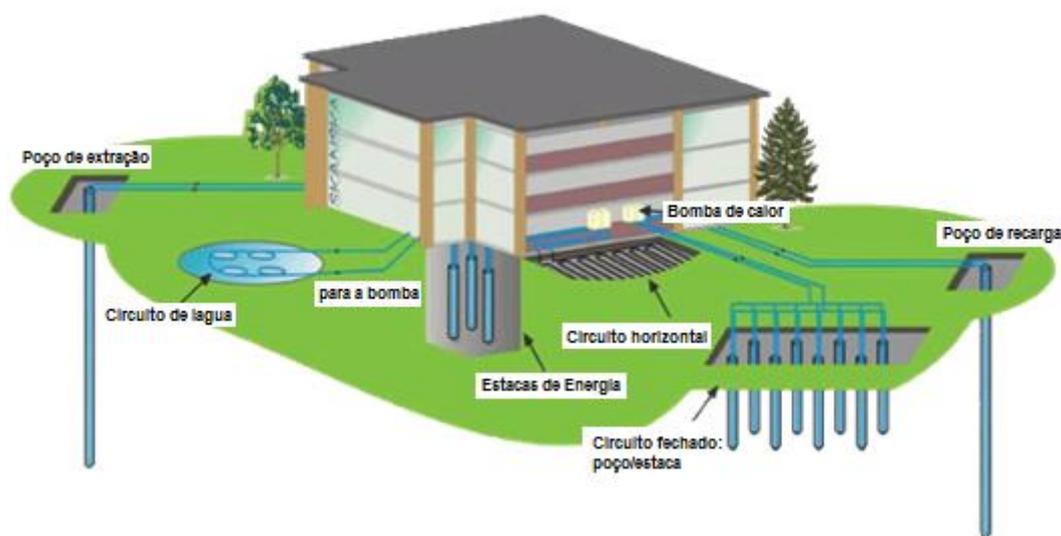


Figura 3.1 - Categorias dos sistemas GSHP (Hemmingway, 2011)

A aplicação de sistemas trocadores em fundações é uma das mais utilizadas junto com os sistemas horizontais. Além de existir aplicações em fundação, estes sistemas também podem ser desenvolvidos em outras estruturas mostradas na Figura 3.2, como pavimentos e estacionamentos, pistas de aeroportos, tabuleiros de pontes, túneis (*Energy tunnels*), muros de contenção, plataformas para estações de metrô, aquecimento de grama para estádios, entre outras aplicações (Brandl, 2006).

A temperatura que os sistemas fornecem depende das condições climáticas, os materiais que interatuam e a configuração do sistema. Existe uma relação entre temperatura e profundidade no solo que foi descrita no Capítulo 1 que mostra o comportamento constante da temperatura depois de certa profundidade no tempo. Pode-se mostrar que entre 5 e 10 metros de profundidade a temperatura varia pouco, pelo que é considerada quase constante na profundidade e ao longo do ano. É por isto que os sistemas GSHP tomam vantagem desta

condição onde o solo maior temperatura do que a atmosfera no inverno e menor no verão. No inverno, o calor é extraído do solo e transferido para áreas interiores do prédio por meio do fluido que circula dentro das tubulações, mesmo assim, o processo é inverso no verão, onde a temperatura do solo é utilizada para ajudar no processo de esfriamento.

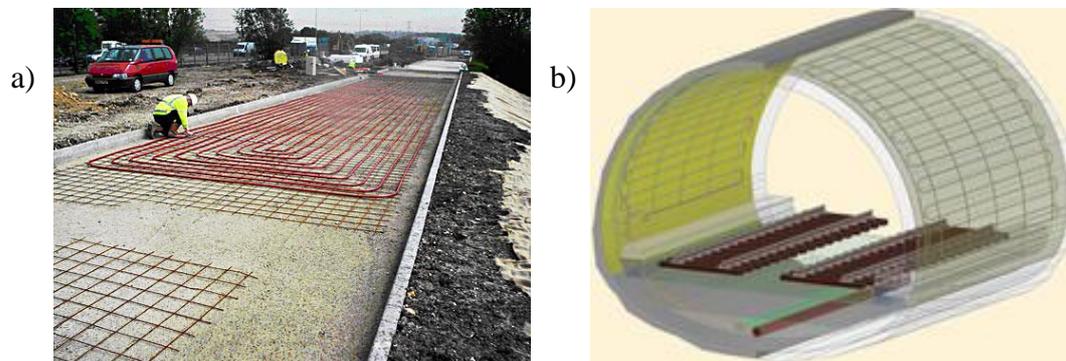


Figura 3.2 - Exemplos de sistemas GSHP em. a) estruturas de pavimento b) túneis de energia

Embora empregar sistemas geotérmicos para o acondicionamento de prédios se requer trabalho e investimento inicial relativamente maior, estes sistemas ao longo prazo são economicamente viáveis comparados com os diversos sistemas convencionais de acondicionamento. Segundo Heinz Brandl (*Danube-European Conference of Geotechnical Engineering*, 2010) e a *GSHP Association*, existem múltiplas vantagens e benefícios na utilização dos sistemas geotérmicos que podem ajudar na escolha do sistema de acondicionamento (GSHP ou sistemas convencionais):

- Amigáveis com o meio ambiente, não geram gases contaminantes, nem são fontes de contaminação, pelo contrário, reduzem o consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>.
- Promovem o cumprimento de tarefas internacionais no âmbito ambiental (Kyoto, Toronto targets, etc).
- Baixos custos no funcionamento e ciclo de vida comparada com sistemas convencionais.
- Longo ciclo de vida do sistema (50 anos e para bomba entre 20 e 25 anos).
- Aumenta o conforto ambiental das pessoas dentro de prédios, edificações e casas devido às grandes superfícies de irradiação de calor em paredes e pisos (em inverno).
- Manutenção mínima tanto para a bomba como para tubulações. Não precisa de pessoal especializado.
- Ótimo comportamento hidro-térmico para importantes locações com museus e galerias artísticas.

- Não requer armazenamento de combustíveis.
- O esfriamento geotérmico substitui o condicionamento de ar convencional, que comumente é barulhento e anti-higiênico.
- O sistema geotérmico pode ser combinado com outros sistemas de energia.
- São sistemas apoiados e incentivados pelo governo em muitos países do mundo.
- Os custos energéticos dos sistemas geotérmicos não são dependentes de flutuações inesperadas.
- Devido às relativas baixas temperaturas e pressões do sistema existem poucas probabilidades de qualquer risco de contaminação no solo.
- Alta confiabilidade: poucas partes móveis, sem exposição ao clima.
- Alta segurança: sem componentes visíveis de ser danificados ou vandalizados.

### **3.2. SISTEMAS GSHP NO MUNDO**

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos em 2009 a nível global existe um grande mercado dos sistemas geotérmicos, as estatísticas em cada país são limitadas, porém, algumas são apresentadas recentemente em informes de ordem internacional. A aplicação e o importante aumento dos sistemas GSHP obedecem ao grande avanço tecnológico e os grandes compromissos ambientais de muitos países que mudam a produção energética a sistemas baseados em fontes renováveis, deslocando assim, às fontes energéticas tradicionais como o petróleo e a hidroenergia (*U.S. Department of Energy, 2009*).

#### **3.2.1. América**

Na América os sistemas de condicionamento baseados em fontes geotérmicas superficiais são utilizados nos países do Norte. Estados Unidos e Canadá são, até o momento, os países que implementam este tipo de tecnologia em edificações residenciais, industriais e rurais.

- *Estados Unidos*

Durante os anos 80s os Estados Unidos iniciou o desenvolvimento de pesquisas relacionadas com os sistemas geotérmicos para a substituição da energia elétrica. Em 1985 o país teve aproximadamente instalado 14,000 unidades de bombas. Este valor na atualidade tem-se acrescentando de forma exponencial atingindo-se mais de 1.5 milhões de unidades instaladas (*U.S. Department of Energy, 2009*). Os Estados Unidos é o país que mais potencial energético tem instalado em sistemas geotérmicos com aproximadamente 56% da capacidade

---

mundial (*U.S. Department of Energy*, 2009). Em 1999, estima-se que 400,000 unidades de bombas geotérmicas operavam para aplicações comerciais e residenciais. Este país Americano contou no ano 2008 com uma oferta de aproximadamente 1,000,000 unidades de sistemas GSHP instalados, que no ano 2010, se acrescentou até atingir uma capacidade energética de mais de 12,000 MWt instalados (Xiaobing Liu, 2012). Segundo o departamento de energia dos Estados Unidos, se estima que no país foram vendidos aproximadamente 60,000 unidades de sistemas geotérmicos por ano.

- *Canadá*

Na Canadá, os sistemas geotérmicos são comercialmente utilizados desde os anos 70s. Em 1990 o país tinha aproximadamente 450 unidades instaladas, que para o ano 2000 superou as 14.000 unidades instaladas. No ano 2010 o país atingiu as 79,000 instalações de sistemas geotérmicos, que desde o ano 2005, foi projetado com uma tendência de crescimento exponencial (Raymond, 2015). Segundo a *CGC* (2012) 54.4% dos sistemas GSHP utilizados no país eram circuitos horizontais, 24.2% circuitos verticais e o 19.4% outros sistemas geotérmicos baseados em água (lagos e poços). Embora a quantidade destes sistemas tenha diminuído o número de unidades instaladas por ano desde 2010, em 2013 o país contava com uma oferta energética de 103.000 unidades de sistemas GSHP instalados, que representam uma capacidade de 1449 MWt (Raymond, 2015).

### **3.2.2. Ásia**

Os sistemas trocadores de calor têm tido uma grande expansão e um grande avanço especialmente na China, Japão, Índia e Coreia do Sul. No começo do milênio o crescimento dos sistemas geotérmicos na Ásia foi notável na maioria destes países. Aproximadamente o 5% dos sistemas GSHP do mundo estão instalados neste continente (*U.S. Department of Energy*, 2009).

- *China*

A tecnologia GSHP na China tem incrementado rapidamente desde que foi introduzida nos anos 90s (Xiaobing Liu, 2012). Foi uma colaboração entre os governos da China e os Estados Unidos. Aproximadamente 227 milhões de m<sup>2</sup> foram climatizados na China a partir desta tecnologia nos que entram todo tipo de edificação: residencial, comercial e industrial (Xu 2008). Os sistemas são principalmente utilizados para fins residenciais e também em regiões com presença de estações climáticas. No ano 2009, a China tinha aproximadamente

630 MWt instalados em sistemas GSHP (*U.S. Department of Energy*, 2009). Adicionalmente o 32% dos sistemas instalados trabalham com circuitos fechados, 42% são sistemas fechados de poços trocadores de calor e 26% são sistemas não convencionais (Xu, 2008).

- *Japão*

Entre os anos 60s e 70s o Japão instalou em áreas urbanas os primeiros sistemas trocadores de calor que consistiam em circuitos abertos. Com o tempo, regulamentos do governo central proibiram a instalação destes sistemas devido ao impacto ambiental ocasionado na época. Nos anos 80s, depois da crise energética, foram instalados os primeiros circuitos fechados na cidade de Hokkaido. Realizaram-se poços trocadores de calor durante a época chegando assim a instalar-se 10 unidades por ano (Kasumi Yasukawa, 2015). Com a ajuda do governo e o setor privado, no ano 2001 começou-se a promover uma campanha para subsidiar a instalação de sistemas GSHP. Segundo o MOE (2012), no Japão tem-se instalado 990 unidades desde o ano 1981, atingindo uma capacidade energética de mais de 62 MWt em sistemas instalados. A mesma entidade registra mais de 800 estacas de energia construídas até o ano 2012. Atualmente Japão tem mais de 1500 unidades de sistemas GSHP instalados onde são utilizados estes sistemas para usos residenciais, industriais e comerciais. Existem muitos projetos esportivos e institucionais e comerciais, como construção de estádios e edificações governamentais e comerciais que levam sistemas GSHP como ferramenta de ambientação (*Ministry of environment of Japan*, 2014).

- *Coreia do sul*

Desde 2004, a instalação destes sistemas vem apresentando um crescimento de forma exponencial. Antes do ano 2010, a Coreia tinha uma capacidade instalada nestes sistemas menor a 200 MWt. Depois do ano 2010, com ajuda de subsídios governamentais, o crescimento anual dos sistemas GSHP no país foi aumentando aproximadamente 50% com instalação de 100 MWt por ano. De acordo as estatísticas apresentadas pela *New and Renewable Energy Deployment Statistics* by KEMCO, a Coreia do Sul apresenta um número de unidades instaladas maiores a 7000 unidades, o que representa uma capacidade energética com estes sistemas de aproximadamente 800 MWt instalados para o ano 2014. De acordo ao *Survey of Kwon et al.* (2012), 65% das instalações são para edificações de oficinas e 35% no uso residencial rural e urbano (Kwon et al., 2012). No ano 2014, aproximadamente 75% dos sistemas GSHP verticais utilizaram circuitos fechados (poços ou estacas de energia), 16%

foram sistemas de poços com circuito aberto e aproximadamente de 5.5% dos sistemas GSHP foram horizontais (KEMCO, 2015).

### 3.2.3. Europa

Com aproximadamente 1,014,436 unidades (bombas geotérmicas) que representam 12,611 MWt de capacidade aproximadamente, a Europa é o continente líder no uso da tecnologia geotérmica superficial. Toda a capacidade energética (maior que 10 MWt) que têm os países Europeus com os sistemas geotérmicos podem ser observadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Unidades GSHP instaladas e Capacidade Energética destes sistemas em países Europeus no ano 2010 maiores que 10 MWt.(EurObserv'ER, 2011)

País	Unidades	Capacidade Instalada MWt
Suécia	378 311	4 005.0
Alemanha	205 150	2 570.1
Finlândia	60 246	1 113.0
França	151 938	1 671.3
Áustria	61 808	729.5
Holanda	29 306	745.0
Dinamarca	20 000	160.0
Polônia	19 320	257.0
Reino Unido	18 390	239.1
Irlanda	11 658	202.7
Republica Tcheca	13 349	197.0
Itália	12 357	231.0
Bélgica	13 085	257.0
Estônia	6 382	91.8
Eslovênia	3 948	54.8
Lituânia	2 221	41.5
Bulgária	543	20.6
Grécia	350	50.0
Eslováquia	2 000	25.7
Hungria	4 030	43.0

- *Suécia*

Em 1985 um grande crescimento do uso de sistemas GSHP foi notável depois de se vender mais de 50,000 unidades na Suécia. Com ajuda do governo por meio de subsídios, este número foi se incrementando até 1995 baixando assim os preços da energia elétrica e

estimulando o uso do sistema. Desde esse momento o sistema GSHP foi ocupando maior espaço no mercado gerando como consequência a instalação de 2000 unidades por ano (Lind, 2011). No ano 2000 a Suécia passou de aproximadamente 23,000 novas unidades instaladas de alta tecnologia a 125,000 no ano 2006. Atualmente existem mais de 700,000 bombas de calor instaladas (Forsén & Bertensam, 2008), onde 350,000 unidades são geotérmicas, obtendo assim, uma capacidade de 3500 MWt só com bombas geotérmicas.

- *Áustria*

Áustria foi uns dos países pioneiros na busca de soluções energéticas baseadas em fontes renováveis. Atualmente, na Áustria se utilizam sistemas de climatização para edificações residenciais, comerciais e industriais de todo tipo. São utilizados principalmente para fins residenciais urbanos e rurais. No país se têm construído edificações (como estações de metrô) realizando estacas e paredes diafragmas de energia como sistemas de aproveitamento ambiental (Brandl, 2006). Desde o ano 2005, a Áustria conta com uma instalação de aproximadamente 6000 estacas por ano, chegando assim às mais de 60,000 estacas de energia instaladas no ano 2010. Adicionalmente, o país conta com mais de 250,000 bombas de calor, 61,000 delas geotérmicas, mostrando-se assim o sucesso do sistema com o tempo (Brandl, 2006). Desde o ano 2000, o incremento na aplicação da tecnologia tem prevalecido atingindo um incremento de 5000 unidades por ano, efetuando-se assim uma redução de 300,000 toneladas de combustível anualmente.

- *Reino Unido*

Os sistemas trocadores de calor tardaram muito em decolar no Reino Unido devido à alta disponibilidade e preços relativamente baixos do gás (Amis & Loveridge, 2014). Porém, o constante crescimento do preço da energia elétrica foi um fator importante, que se tornou mais caro e aproximando ao preço do gás. Realmente o crescimento e utilização destes sistemas foram considerados quando a partir do ano 2001 foi registrado um incremento de 50% das instalações aproximadamente. Com o tempo, o sistema de bombas de calor incrementou consideravelmente, chegando a instalar-se no ano 2008 mais de 3500 unidades (Feuvre & Cox, 2009). Atualmente, existem mais de 18,000 bombas instaladas no Reino Unido que incluem sistemas trocadores de calor horizontais e verticais diretos e indiretos como estacas de energia, sistemas de tubulações e poços trocadores de calor.

Desde o ano 2012 o aumento na implementação de estacas de energia foi notável quando foram incluídos circuitos dentro de fundações como aproveitamento energético para o uso de aquecimento/esfriamento. As estacas de energia foram essenciais para a aplicação e utilização destes sistemas com novas tecnologias. No ano 2012, a região tinha quase 5000 estacas de energia em funcionamento, salvando mais de 6000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, com tendência ao crescimento destas unidades e salvamento de mais contaminação com mais de 50 novos projetos hoteleiros e de grandes indústrias (Amis & Loveridge, 2014).

### **3.3. TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA (TRT)**

O Teste de Resposta Térmica TRT (*Thermal Response Test*), é um ensaio de campo usado como um meio de determinação das propriedades térmicas médias do projeto em sistemas de troca de calor como lagoas, poços e fundações realizadas em solo ou rocha. São avaliados os materiais que interagem com o solo e os efeitos do nível da água freática (Gehlin, 2002). Com este ensaio se obtém propriedades como a condutividade térmica média do sistema solo-estaca, a resistividade do sistema trocador e as condições iniciais de temperatura do solo.

O teste consiste em aplicar uma potência de aquecimento constante (entre 50 e 80 W/m) através de um fluido de circulação implementando uma bomba hidráulica e sistemas de monitoramento (ver Figura 3.3). Neste ensaio, é medida indiretamente a troca de calor entre o solo e a estrutura trocadora de calor onde resultam mudanças de temperatura do fluido que circula pelas tubulações (Gehlin, 2002).

Pesquisas mostram que, pelo menos, para estacas de pequeno diâmetro (até 450 milímetros de diâmetro), o TRT pode ser aplicado a estacas de energia, sujeitos a uma análise cuidadosa dos métodos, do comprimento e da interpretação do teste.

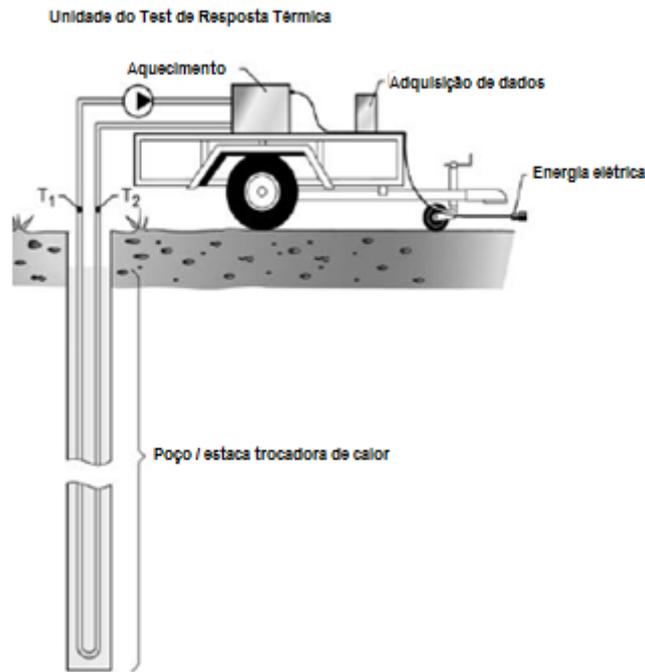


Figura 3.3 - Equipamento para o Teste de Resposta Térmica.(Gehlin, 2002)

A técnica avalia a temperatura do fluido e o tempo obtendo as propriedades térmicas do solo ao redor do elemento trocador de temperatura. A resposta térmica da informação sobre a diferença de temperatura que existe entre o fluido e o solo circundante. Para analisar o gradiente de temperatura na tubulação devem-se realizar soluções analíticas a partir das temperaturas de entrada e saída desse fluido. A temperatura média do fluido circulante na tubulação pode ser representada como a média das temperaturas de entrada e saída do elemento (Gehlin, 2002), calculada como:

$$T_f = \frac{T_{\text{entrada}} + T_{\text{saída}}}{2} \quad (5)$$

A quantidade média de calor injetada é utilizada para determinar a temperatura média do elemento trocador ( $T_e$ ). Quando a potência de injeção é constante as temperaturas  $T_f$  e  $T_e$  variam com o tempo, mas depois de um certo tempo a diferença  $\Delta T = T_f - T_e$  que tende a um valor constante o que dá como resultado um estado de fluxo estável ou “*Steady-state flux*”. Neste estado  $\Delta T$  cresce proporcionalmente à potência de calor injetada por metro no elemento  $q_e$  (Gehlin, 2002). Porém, manter a potência de injeção em um valor constante não é certamente fácil, devendo-se considerar uma superposição de efeitos térmicos ao mudar a potência de injeção. Este procedimento é descrito por pela Eq. (6).

$$T(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = \Delta T(q_1) + \Delta T(q_2) + \Delta T(q_3) + \dots + \Delta T(q_n) \quad (6)$$

Devido a fatores como o custo e o tempo de ensaio as estacas trocadoras de calor para ensaios TRT são configuradas com diâmetros de 300 mm (GSHPA, 2012). O ensaio para este tipo de elementos é similar ao ensaio praticado para poços trocadores de calor (boreholes heat exchangers) determinando assim a temperatura média da formação não perturbada (se é requerida), a condutividade térmica e a resistência térmica da estaca (Gehlin, 2002).

No ensaio TRT a propriedade de condutividade e resistência do sistema trocador de calor pode ser obtida através dos resultados registrados pelo equipamento de aquisição de dados. A condutividade térmica do sistema se obtém por meio da Eq. (7):

$$k_e = \frac{q_e}{4\pi m_c} \quad (7)$$

Onde  $m_c$  [ $^{\circ}\text{K/s}$ ] é a inclinação da envoltória linear dos resultados em escala Logaritmo natural mostrada como exemplo na Figura 3.4, e  $q_e$  é a potencia de calor injetado na entrada da estaca [W].

E a resistência térmica do sistema de estaca é dado pela Eq. (8).

$$R_e = \frac{H}{q_e} \left[ T_f(t) - \left\{ \frac{q_e}{4\pi k_e H} \right\} \ln t - T_0 \right] - \frac{1}{4\pi k_e} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (8)$$

Onde  $H$  é a profundidade da estaca [m],  $q_e$  a energia de calor injetada [W],  $T_f(t)$  é a função de evolução de temperatura média [K],  $T_0$  é a temperatura inicial do solo [K],  $t$  é tempo [s],  $\alpha$  difusividade do solo [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $r_b$  o raio do poço ou estaca [m],  $\gamma=0.5772$  (numero de Euler) e  $R_e$  a resistência térmica da estaca em concreto.

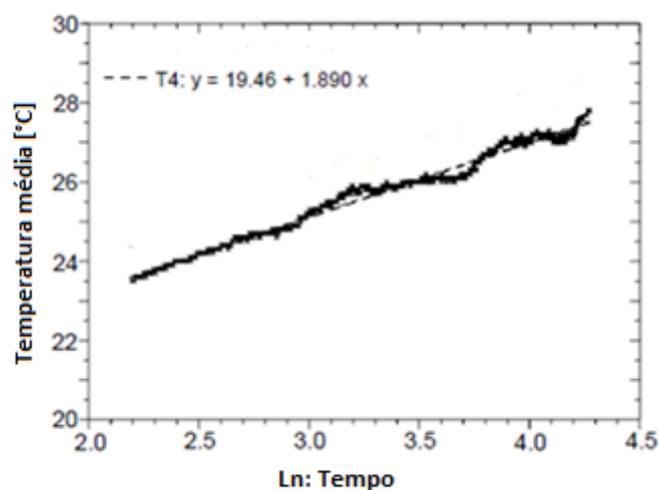


Figura 3.4 - Envoltória logarítmica para a temperatura de saída com o tempo. (Gehlin, 2002)

Para o caso da temperatura média de formação não perturbada o ensaio não deve ser iniciado antes de 21 dias da concretagem da estaca (GSHPA, 2012). Existe uma variação da temperatura do solo durante a etapa de concretagem da estaca devido às reações químicas existentes durante a solidificação do elemento, e é por isto que é necessário atingir o equilíbrio térmico em todo o comprimento da estaca para se começar o teste. As temperaturas ao longo da estaca são obtidas por meio de sensores de temperatura localizados na zona de não flutuação de temperatura. Para fins práticos, o equilíbrio da temperatura pode-se supor quando em uma série de três leituras diárias sequenciais se logra observar uma variação máxima de 0.5 °C.

Para estacas com diâmetros maiores a 300 mm se requer um tempo muito longo para obter suficiente informação térmica do solo e da estaca. Segundo a GSHPA o tempo de interpretação de dados não deve ser menor que o tempo  $t$  determinado pela Eq. (9).

$$t = \frac{5 r_e^2}{\alpha} \quad (9)$$

Onde  $r_e$  é o raio da seção da estaca e  $\alpha$  a difusividade térmica.

### 3.4. VISÃO GERAL DOS SISTEMAS DE TROCADORES DE ENERGIA

No campo da geotecnia, as fundações profundas como estacas são conhecidas pela transferência de carga realizada por meio do fuste (atrito entre estaca-solo) e ponta. A troca de calor entre a estrutura de fundação e o solo circundante vem sendo uma inovação da engenharia nos últimos anos. O sistema se compõe de um circuito primário (incorporado na estaca) que se liga a uma bomba geotérmica (ou também chamada bomba de calor) que funciona com energia elétrica e um circuito secundário que passa dentro do prédio incorporando-se as lajens e paredes (Brandl, 2006).

De todos os sistemas GSHP, as estacas trocadoras de calor são elementos que fornecem maior eficiência energética. Uma única estaca de energia pode fornecer entre 25 a 60 W/m dependendo do seu tamanho e detalhes da construção, o solo circundante e o uso dado do sistema (Bourne-Webb, 2013).

A transferência de calor e a eficiência do sistema dependem dos materiais que interatuam no fenômeno e do regime do fluxo circundante (laminar/turbulento). A turbulência aumenta a transferência difusora de energia, impulso e massa. Por isso, se o número de Reynolds do fluxo estiver abaixo de  $Re=2300$ , o fluxo laminar ocorre e se esperam baixas

taxas de extração de calor, mas se o número é maior do que 4000, o fluxo está em um regime turbulento que aumenta a troca de calor. Entre estas duas fronteiras, o fluxo comporta-se como um fluxo transitório, onde o fluxo é laminar ou turbulento ou a mistura dos dois estados. (Bidarmaghz, Narcilio, & Johnston, 2013).

A bomba aquecedora normalmente utilizada para este sistema tem um papel muito importante na obtenção da temperatura final do sistema. Segundo Brandl (2006), este equipamento por meio da energia elétrica ajuda a esquentar ou esfriar o fluxo que circula dentro bomba, trocando calor com o fluxo que sai da estaca e aumentando/diminuindo essa temperatura ainda em um nível maior/menor. Para obter a temperatura final do processo tanto a estaca como a bomba devem trabalhar mudando a temperatura inicial do fluxo, sendo que a estaca deve contribuir com maior trabalho energético do que a bomba de calor. Para que o sistema seja economicamente viável, nesse sentido se requer uma bomba que utilize menor energia para mudar temperatura do que a energia requerida pelo sistema de estacas.

Existe uma forma energética de avaliar a bomba de calor num sistema trocador de calor. O Coeficiente de desempenho (Coefficient of Performance - COP) de uma bomba de calor justamente é o parâmetro que mede essa eficiência relacionando a energia total que requer o sistema para mudar a temperatura com a energia elétrica da bomba.

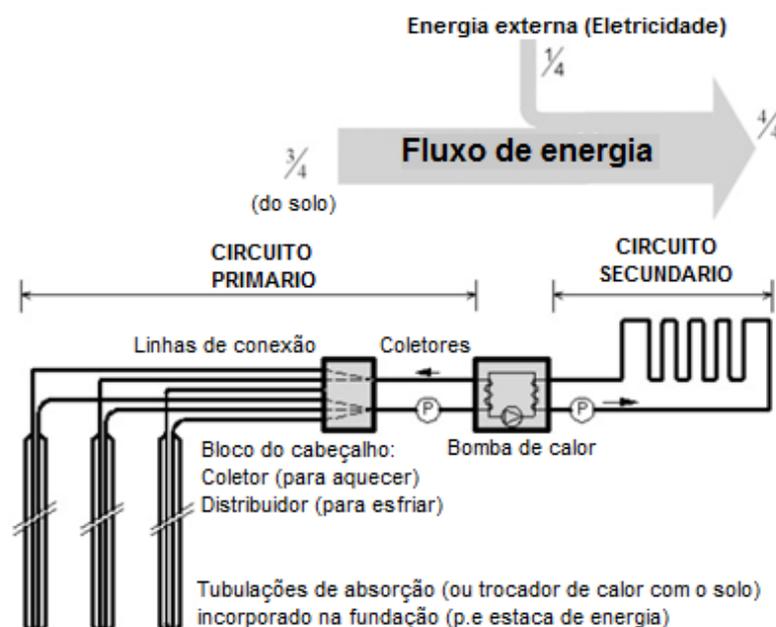


Figura 3.5 - Estrutura energética de um sistema trocador de energia com COP=4 (Brandl, 2008)

O parâmetro COP segundo Brandl (2006) pode ser determinado pela Eq.(10).

$$\text{COP} = \frac{\text{Mudança de energia total do sistema [kW]}}{\text{Energia de operação da bomba [kW]}} \quad (10)$$

Um valor de COP=4, como se mostra na Figura 3.5, define que 1/4 parte da energia total utilizada para mudar a temperatura inicial do sistema é energia elétrica, enquanto 3/4 dela se processa com energia geotérmica. Atualmente, no mercado se conseguem bombas geotérmicas com COP entre 3 e 6, e por isto, as normativas internacionais propõem um desenho adequado do elemento que é relativa às condições climáticas e energéticas de cada problema particular.

Para um processo de aquecimento (inverno), por exemplo, o fluxo dentro da bomba troca calor com o fluxo do circuito primário que tem maior temperatura do que o fluxo que flui pela bomba. Com este contato térmico e ajudado com energia elétrica, o fluido se evapora e passa por um compressor que aumenta novamente a temperatura para passar por um condensador. No condensador o fluido da bomba troca calor com o fluido do circuito secundário por meio do contato das tubulações. Com este segundo contato o fluido que circula na bomba diminui temperatura e o fluido do circuito secundário aumenta temperatura, levando assim, para as diferentes redes de condicionamento dentro do prédio uma temperatura maior à temperatura ambiente. Finalmente, o líquido da bomba passa por uma válvula de expansão onde diminui novamente a temperatura para ter contato com o fluxo do circuito primário e repetir o processo. Esta técnica ao ser invertida (no verão) é utilizada para um processo de esfriamento (Figura 3.6).

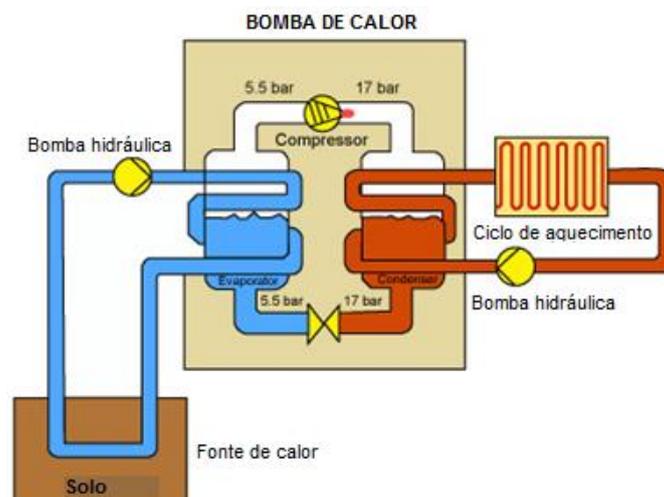


Figura 3.6 - Bomba de calor para um Sistema GSHP (European GSHP Association, 2011)

Finalmente, o desenho de estacas de energia depende de vários parâmetros. A dependência de variáveis como o diâmetro e comprimento das tubulações, as propriedades da parede da tubulação, a condutividade térmica dos materiais, a capacidade de calor específico e a densidade e viscosidade do fluido que circula na dentro da estaca são exemplos de algumas delas. Uma estaca de energia não tem limitação de profundidade e diâmetro já que o potencial de energia aumenta com o volume da estrutura, mas devem ser avaliadas as variáveis com a eficiência térmica por comprimento de estaca para definir a viabilidade. O comprimento economicamente viável para garantir o funcionamento térmico deste sistema é de 6 m de profundidade como mínimo (Brandl, 2006). Porém, se deve considerar a efetividade térmica de estacas muito profundas, as quais geralmente não têm resultados economicamente viáveis ao ultrapassar uma profundidade característica do solo. Achar esta profundidade característica por meio de modelagens paramétricas numérica de cada caso aperfeiçoa o projeto e contribui nos custos das obras.

### **3.5. EQUAÇÕES DE CONTINUIDADE E BALANCE ENERGÉTICO EM UMA ESTACA DE ENERGIA.**

O problema de transferência de calor para qualquer sistema trocador que tem como fonte de calor o solo se relaciona o fenômeno de troca energética a um acoplamento térmico devido à participação de vários materiais com condições de contorno particulares. Por isto a solução do problema deve ser ligada às formulações e leis da termodinâmica proposta para fluxos e sólidos. O regime do fluxo também é uma limitante na obtenção dos resultados e levar em conta as diferentes formulações hidráulicas para tubulações é uma necessidade para se obter uma resposta real.

Para vincular os fenômenos de transferência de calor por condução e convecção dentro da tubulação (volume de control), são necessários de métodos analíticos de aproximação ou numéricos. Um Modelo 3D ou 2D de elementos finitos é uma das alternativas de solução. Neste caso, são descritas as equações que o software COMSOL Multiphysics utiliza para determinar a resposta térmica dos modelos. Requerem-se, então, equações de conservação da energia, continuidade de momento e massa de problemas hidráulicos e térmicos no qual uma parte diferencial da tubulação vem sendo o volume de controle a analisar.

O balanço de energia na transferência de calor entre o fluxo e estaca de concreto é representado impondo-se as condições de contorno de calor convectivas nodais. Para isto, uma análise do que acontece na tubulação se realiza em 1D considerando a temperatura no

interior e exterior da tubulação e a condutividade efetiva do material da tubulação. Portanto, a equação de balanço de calor que resolve o problema da transferência de calor na tubulação é dada na Eq. (11).

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u e_t \cdot \nabla_t T = \nabla_t \cdot (A k \nabla_t T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + q_G + q_{wall} \quad (11)$$

Onde  $e_t$  é o vetor tangencial unitário ao longo da borda da tubulação,  $u$  velocidade unidimensional [m/s],  $T$  temperatura [K],  $C_p$  a capacidade térmica específica do fluido [J/kg.K],  $k$  condutividade térmica [W/m.K],  $f_D$  é o fator de atrito de Darcy,  $A$  área da secção transversal da tubulação [m<sup>2</sup>].

Sendo,

$$q_{wall} = h_{eff}(T_g - T_f) \quad (12)$$

E para uma tubulação de secção circular,

$$h_{eff} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_i h_{int}} + \frac{1}{r_e h_{ext}} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k_{HDPE}}} \quad (13)$$

Onde  $d_h$  é o diâmetro hidráulico da tubulação [m],  $u$  a velocidade do fluxo dentro da tubulação,  $r_e$  e  $r_i$  são os limites exterior e interior da tubulação respectivamente [m],  $T_g$  e  $T_f$  a temperatura da calda cimento no domínio e do fluido circulante respectivamente,  $h_{eff}$  [W/m<sup>2</sup>.K], e  $k_{HDPE}$  [W/m.K], correspondem ao coeficiente de transferência de calor efetivo e condutividade térmica do material da tubulação (HDPE). Os termos  $h_{ext}$  e  $h_{int}$  são coeficientes de transferência de calor que dependem do tipo de regime do fluxo (laminar/turbulento) [W/m<sup>2</sup>K], determinados pelos números de Nusselt, Reynolds e Prandtl.

Sendo,

$$h_{int} = Nu \frac{k}{d_h} \quad (14)$$

E os números adimensionais:

$$Nu_{lam} = 3.66 \text{ (para secção circular)} \quad (15)$$

$$\text{Nu}_{\text{turb}} = \frac{\left(\frac{f_D}{8}\right) (\text{Re} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f_D}{8}} (\text{Pr}^{1/3} - 1)} \quad (16)$$

$$\text{Nu} = \max(\text{Nu}_{\text{lam}}, \text{Nu}_{\text{turb}}) \quad (17)$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (18)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V d_h}{\mu} \quad (19)$$

O fator de atrito de Darcy segundo Colebrook para tubulação lisa (HDPE),

$$f_D = \max(f_{\text{TURB}}, f_{D0}) \quad (20)$$

$$f_{D0} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (21)$$

$$\sqrt{\frac{1}{f_{\text{TURB}}}} = -1.8 \log_{10} \left( \frac{6.9}{\text{Re}} \right) \quad (22)$$

Onde  $V$ ,  $\rho$  e  $\mu$  são a velocidade média na secção, a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido correspondentemente.

O movimento e transporte de fluidos em tubulações está descrito pelas conhecidas equações de Navier-Stokes para um fluido newtoniano-incompressível. Estas formulações descrevem a lei de continuidade de um fluido pela conservação de massa e momento determinados nas Eqs (23) e (24) (Bidarmaghz, Narcilio, & Johnston, 2013).

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (23)$$

Equação de conservação de momento:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla P I + \mu \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} u + F \quad (24)$$

Onde  $u$  representa o campo de velocidade [m/s]  $\rho$  é densidade do fluxo,  $\mu$  é viscosidade dinâmica,  $P$  é pressão,  $I$  é a matriz identidade,  $T$  temperatura e  $F$  as forças externas.

Finalmente, para um regime turbulento, dependente do tempo, essas mesmas equações devem ser calculadas pelas formulações “*Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)*” descritas nas Eqs. (25) e (26).

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (25)$$

Equação de conservação de momentum:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u + \rho u \cdot \nabla(\bar{u}\bar{u}) = -\nabla\bar{P} + \mu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \rho \cdot \frac{\partial}{\partial x} (u'u') + F \quad (26)$$

Onde no regime turbulento,

$u(x, y, z, t) = \bar{u}(x, y, z) + u'(x, y, z, t)$  é o campo de velocidade.

$P(x, y, z, t) = \bar{P}(x, y, z) + P'(x, y, z, t)$  o campo de pressão.

### 3.6. MODELOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO

A condutividade térmica dos solos pode ser determinada a partir das correlações empíricas ou semi-empíricas baseadas nas propriedades básicas do solo como densidade aparente, densidade seca do solo, porosidade, quantidade de quartzo no solo e a umidade do solo. Na literatura existem correlações que se aproximam ao valor esperado da condutividade térmica dos solos. Em seguida, são mostrados os alguns modelos recentes e as correspondentes formulações para determinar o valor da condutividade do solo.

- **Modelo de Kersten (1949)**

Em 1949 Kersten fez as primeiras correlações empíricas que relacionam algumas propriedades físicas dos solos e rochas com a condutividade térmica deles. As equações foram determinadas tanto para solos congelados como para solos não congelados. As equações que determinam a condutividade térmica dos solos são:

$$\text{Areias: } k = 0.1442 \times (0.7 \log w + 0.4) \times 10^{0.0006243\rho} \quad (27)$$

$$\text{Siltes e argilas: } k = 0.1442 \times (0.7 \log w + 0.4) \times 10^{0.0006243\rho} \quad (28)$$

Onde  $k$  é condutividade térmica [W/m.K],  $w$  é teor de umidade [%] e  $\rho$  é a densidade aparente do solo [kg/m<sup>3</sup>]

A partir destas correlações, muitos autores aportaram mais correlações, devido que ainda não se considerava a variável da umidade de muita importância na mudança dos valores da condutividade térmica. Por isto, foram desenvolvidos modelos alternativos semi-empíricos que se derivam desta filosofia, sendo o Johansen (1975) quem desenvolveu este conceito matematicamente. Alguns mais recentes, são os modelos de Cotê e Konrad (2005) e Lu et al. (2007).

- **Modelo de Johansen (1975)**

O modelo de Johansen foi desenvolvido para tipo de solos congelados e não congelados. Ele expressou a condutividade térmica em termos da condutividade seca e saturada do solo. A condutividade não saturada do solo pode ser determinada de acordo com a Eq. (29).

$$k = (k_{sat} - k_{seco})K_e + k_{seco} \quad (29)$$

Onde  $k_{sat}$  e  $k_{seco}$  são as condutividades térmicas no estado seco e saturado do solo, e,  $K_e$  o número de Kersten que depende do grau de saturação do material. O número pode ser calculado de acordo às Eqs (30) e (31).

Para solos grossos com  $S_r > 0.05$ ,

$$K_e = 0.7 \log_{10}(S_r) + 1 \quad (30)$$

E para solos finos com  $S_r > 0.10$ ,

$$K_e = \log_{10}(S_r) + 1 \quad (31)$$

Johansen desenvolveu uma equação semi-empírica que descreve o comportamento da condutividade térmica do material seco, descrito como:

$$k_{seco} = \frac{0.137 \rho_d + 64.7}{\rho_s - 0.947 \rho_d} \pm 20\% \quad (32)$$

Sendo  $\rho_d$  e  $\rho_s$  a densidade seca do solo e densidade dos sólidos do solo respectivamente.

A densidade saturada do solo pode ser determinada como:

$$k_{sat} = k_s^{(1-\eta)} k_w^\eta \quad (33)$$

Onde  $\eta$  é o valor da porosidade e  $k_s$  a condutividade dos sólidos, que depende da quantidade de minerais que o solo tem,  $k_w$  a condutividade térmica da água.

A condutividade térmica dos sólidos depende em sua maioria dos minerais presentes na parte sólida. Este parâmetro se encontra diretamente relacionado com a presença do quartzo e pode ser calculado como:

$$k_s = k_{qz}^{qz} k_o^{(1-qz)} \quad (34)$$

Sendo  $k_{qz}$  a condutividade térmica do quartzo igual a 7.7 W/m.K,  $k_o$  a condutividade térmica média dos minerais diferentes ao quartzo igual a 2.0 W/m.K e 3.0 W/m.K para solos com  $qz < 0.20$ , e  $qz$  a quantidade volumétrica do quartzo no solo.

- **Modelo de Côté e Konrad (2005)**

É um modelo semi-empírico para determinar condutividade térmica dos solos baseado no modelo de Johansen (1975). Utiliza-se a Eq. (1) como formulação geral no cálculo da variável, mas muda a determinação do parâmetro  $K_e$  e condutividades térmicas  $k_{seco}$  e  $k_{sat}$  do material. Sendo eles:

$$K_e = \frac{\beta Sr}{1 + (\beta - 1) Sr} \quad (35)$$

$$k_{seco} = \chi \times 10^{-\eta n} \quad (36)$$

$$k_{sat} = k_s^{\theta_s} k_w^{\theta_w} \quad (37)$$

Onde  $Sr$  é grau de saturação e  $n$  porosidade do solo,  $\beta$  um parâmetro que depende do tipo de solo e pode ser escolhido da Tabela 3.2, e  $\eta$  e  $\chi$  são parâmetros empíricos que dependem do tipo de solo mostrados na Tabela 3.3. Os símbolos  $\theta_s$  e  $\theta_w$  são teores volumétricos de sólidos e água respectivamente.

Tabela 3.2 - Valores do parâmetro  $\beta$

Tipo de solo	$\beta$
Argilas/Siltos	2.20
Areias	5.60
Pedregulhos	6.50

Tabela 3.3 - Valores dos parâmetros  $\chi$  e  $\eta$

Tipo de solo	$\chi$	$\eta$
Pedregulhos e areias	1.70	1.80
Solos finos e areias naturais	0.75	1.20
Orgânico	0.30	0.87

- **Modelo de Lu et al. (2007)**

Lu et al. (2007) propõem um modelo baseado no modelo de Johansen (1975) e modificado pelo Kôte e Konrad (2005). Neste modelo, se adiciona uma formulação que ajusta por conta do termo da saturação no parâmetro  $K_e$  especialmente para solos finos com baixa saturação.

$$K_e = \exp[(\alpha(1 - Sr^{\alpha-1.33}))] \quad (38)$$

Onde  $\alpha$  é 0.29 para argilas e siltes, 1.05 para areias e 1.08 para areias grossas.

Além disto, se expressa a condutividade seca do solo de forma linear como:

$$k_{seco} = -an + b \quad (39)$$

Onde  $a$  e  $b$  são parâmetros obtidos das amostras ensaiadas para este tipo de modelo, e equivalem a 0.56 e 0.51 respectivamente para porosidades entre 0.2 e 0.6. Os demais valores e variáveis relacionadas com a equação geral de Johansen (1975) são obtidos por meio das equações (30) e (31)

### 3.7. MODELO DE CALCULO DA CAPACIDADE CALORÍFICA ESPECÍFICA DOS SOLOS

A capacidade térmica específica do solo pode ser calculada por meio de formulações empíricas que dão um valor esperado da capacidade térmica em função da densidade seca do material e o conteúdo de água. A capacidade térmica específica do solo se pode determinar com a Eq. (40), demonstrada pelo Johansen (1975) que relaciona as densidades da água, a densidade seca do material sólido, o conteúdo volumétrico de água e a densidade aparente do solo.

$$c_p = \left( \frac{\rho_d}{\rho_w \rho} \right) (0.17 + w) c_{vw} \quad (40)$$

Onde  $c_p$  é capacidade térmica específica do solo [J/kg.K],  $\rho_d$  é a densidade seca do solo,  $\rho_w$  a densidade da água,  $\rho$  a densidade aparente do solo,  $w$  a umidade do solo e  $c_{vw}=4.18 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>.K capacidade volumétrica média da água.

### 3.8. REFERENCIAS NO TEMA DE ESTACAS DE ENERGIA.

Para o entendimento numérico da dissertação, existem bibliografias que descrevem o comportamento termo-hidro-mecânico de uma estaca de energia, que estuda as respostas do

sistema de estaca de energia em diferentes aspectos, e o comportamento completamente térmico que descreve respostas térmicas relacionadas com as configurações eficientes.

### 3.8.1. Comportamento termo-hidro-mecânico das estacas de energia

O estudo do comportamento termo-hidro-mecânico de estacas de energia vem sendo estudado com maior detalhe desde 1998 com a investigação do professor Heinz Brandl. Assim como ele, nesta área se encontram autores de pesquisas com estacas com diferentes geometrias e comprimentos donde foram monitorados parâmetros mecânicos e hidráulicos e de temperatura durante o ensaio. Na Tabela 3.4 se podem observar alguns dos trabalhos que se ressaltam dentro da literatura referentes a estacas de energia e o estudo do comportamento termo-hidro-mecânico delas.

Tabela 3.4 - Autores que estudaram o comportamento termo-hidro-mecânico de estacas de energia. (Bourne-Webb, 2015).

Referência	Localção	Dimensão da estaca De x Le [m]
Brandl (1998)	Viena, Austria	1.20 x 9.0
Laloui et al. (2006)	Lausanne, Suíça	1.00 x 26.0
Bourne-Webb (2009)	Londres, Inglaterra	0.60 x 23.0 0.60 x 30.0
McCartney & Murphy (2012)	Denver, EEUU	0.91 x 14.0
Murphy et al. (2014)	Colorado Springs, EEUU	0.61 x 15.0
Akrouch et al. (2014)	College Station, EEUU	0.18 x 5.5
Wang et al. (2013)	Vitória, Austrália	0.60 x 16.0
Mimouni & Laloui (2015)	Lausanne, Suíça	1.00 x 26.0

Existem publicações importantes sobre o comportamento termomecânico de estacas de energia. Basicamente são identificados três estudos principais em toda a literatura que aportaram ao entendimento do fenômeno termo-mecânico:

- **Heinz Brandl (1998):**

Em 1998 o Professor Dr. Heinz Brandl (Technical University) em Viena, Áustria publica um artigo titulado "Energy piles for heating and cooling of buildings". Nele, fundamentalmente ilustra casos históricos da implementação dos sistemas de estacas de energia e relata alguns resultados de medições in-situ. Entre os casos históricos mostrados, ilustra um plano de reabilitação de um prédio de aproximadamente de 21,500 m<sup>2</sup> onde foram

escavadas 175 estacas de 1.20 m de diâmetro, onde 143 delas funcionaram como estacas de energia. Tinham profundidades de 9.0 a 10.5 m para estacas de fundação e de 9.0 a 17.5 m para muros de contenção.

Na pesquisa se mostram descrevem algumas medições para o longo prazo que foi executado numa estaca de 9 m de profundidade, para isto, foi colocada instrumentação em vários elementos do sistema. Toda esta instrumentação com o objetivo de saber os efeitos da variação de temperatura com a capacidade de carga dos elementos de fundação. Na avaliação do carregamento sobre a estaca, se obteve a resposta do ensaio de carga. Como resultados, se conseguiu obter os carregamentos na cabeça e ponta de uma estaca de energia em diferentes estágios da construção. Desta forma, Brandl analisa os resultados comentando que as tensões residuais são impostas sobre a estaca antes de qualquer carregamento, causadas pelo desenvolvimento de calor na estaca de concreto fresco, devido à hidratação: a contração térmica após temperatura pico provoca uma redução temporária da pressão na base da estaca. Até certo ponto isso continua por um curto período, embora a carga total na cabeça da estaca aumenta com a progressão da construção. Simultaneamente, a fricção no fuste cada vez se mobiliza. No longo prazo a carga na ponta da estaca, foi permanecendo constante, independentemente do aumento da carga e temperatura sobre a estaca de energia. Assim, é concluído que uma operação adequada de uma estaca de energia não tem influência relevante sobre a capacidade do fuste (Brandl, 1998).

Neste trabalho se conclui que a resistência no fuste de estacas de energia não é afetada pelo processo de absorção de calor numa magnitude estaticamente relevante, mas deve-se evitar que a superfície da coluna de estaca seja a uma temperatura abaixo do ponto de congelamento. Solos de grão fino com alto teor de minerais de argila ativos (p.e montmorillonite) são especialmente críticos. Também conclui que o espaçamento ótimo das estacas num grupo de estacas depende da capacidade de armazenamento disponível térmica do solo envolvente e sobre os parâmetros do elemento (diâmetro, profundidade, propriedades térmicas). Além disso, observa que a uma distância de cerca de 2 m a partir de uma única estaca, a flutuação de temperatura no solo saturado com água durante todo o ano é inferior a metade do que ao longo do fuste da estaca. Por último, conclui que as propriedades térmicas de uma estaca de energia podem ser amplamente influenciadas pelas características concretas (composição, espécie de cimento, aditivos, etc.).

- **Laloui. et al. (2006)**

No 1999 Lyesse Laloui junto com Mathieu Nuth e Laurent Vulliet, publicaram os primeiros análises do comportamento termo-hidro-mecânico em uma estaca de energia em Lausanne, Suíça. Foram obtidos resultados experimentais e numéricos utilizando modelos de elementos finitos de uma estaca de energia testada no Instituto Tecnológico Federal (EPFL).

Como resultados experimentais térmicos (sem carregamento) se obtiveram os perfis de temperatura na estaca ao longo da profundidade. As temperaturas foram impostas com um ciclo de esfriamento/aquecimento artificial e logo foram simuladas numericamente com estes resultados.

Também foram obtidas deformações verticais e radiais devido a este fenômeno. Laloui comenta que as deformações no período de aquecimento da estaca não são uniformes e estão influenciadas pela fricção no fuste. Em período de esfriamento, um comportamento termo-elástico linear é observado e simulado. Também se demonstra que existe reversibilidade nas deformações no período de esfriamento. Esse comportamento mostra que as tensões induzidas pelos deslocamentos devido a temperatura não atingiu um limite de fricção que gere deslocamentos plásticos. Os deslocamentos radiais modelados se aproximaram ao comportamento experimental.

Dentro dos resultados mecânicos e de temperatura se têm as seguintes considerações:

- Sob o efeito de um aumento de temperatura, em uma estaca com condições fronteira livre, se sabe que ela dilata.
- No caso em que não é inteiramente livre para mover-se parte ou a totalidade da deformação será impedido.
- As deformações restringidas produzem tensões térmicas. Além disso, se observa a diferencia no nível de esforços verticais atingidos devido ao fenômeno térmico e mecânico e combinado em uma das probas.

No resultado termo-hidro-mecânico, se logrou obter as seguintes considerações:

Para a análise só com tensões térmicas induzidas, no período de aquecimento da estaca se produz uma inchação na parte superior da estaca. As deformações verticais induzidas são principalmente de dilatação. No entanto, como foram observadas experimentalmente, as deformações de compressão são gerados na parte inferior da estaca.

Para a análise termo-mecânica, a carga mecânica (induzida pelo peso do edifício) na estaca não produz qualquer deformação no solo a uma distância no maior a 1 m de profundidade. O efeito do calor na estaca é mais pronunciado que induz pequenas deformações a 1 m de profundidade do fuste. Também, devido aos efeitos mecânicos limitados e as pequenas deformações induzidas causadas pelo calor, tanto a pressão de poros, assim como as tensões efetivas, permanecem quase constante.

- **Bourne-webb et al. (2007)**

Peter Bourne-Webb , B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson e P. Payne no ano 2006 estudaram o comportamento das estacas de energia em Londres provando algumas conclusões feitas no ensaio de Lalouis (2006). Testes de carregamento foram realizados durante ciclos de temperatura durante um período longo para investigar o comportamento de uma estaca de energia instalada nas argilas de Londres. Os testes de carga foram de tipo convencional e realizado até atingir uma carga estendida com ciclos térmicos. Dos resultados obtidos no ensaio de carga, os autores observam que durante todo o período do teste térmico, pequenas flutuações ocorrem dentro dos resultados de deslocamento, que representam a expansão e contração diária da cabeça e corpo da estaca.

São notados diferentes comportamentos termo-mecânico na estaca durante esta investigação:

- Só sob carga, a estaca está em compressão e se move para o solo de suporte e resistência na interface estaca-solo se opõe o carregamento.
- Quando um período de esfriamento é aplicado à estaca, ambas extremidades da estacas estão livres para se deslocar.
- Quando um período de aquecimento é aplicado, a estaca se expande, e qualquer restrição para o fuste de estaca irá, por conseguinte, levaria a um estado de deformação de compressão/tensão em desenvolvimento.
- Quando uma mudança de temperatura é aplicada em conjunto com a carga de compressão, se espera um efeito combinado. Se um ciclo de esfriamento é aplicado em conjunto com uma carga de compressão na cabeça da estaca, as cargas axiais de compressão se tornam menores existindo assim maior tração, entanto a mobilização da resistência do fuste na parte superior da estaca aumenta e reduz na parte inferior.

- Dependendo da magnitude da mudança de temperatura, existe o potencial para que as forças de tensão axial desenvolver-se durante o esfriamento, um aumento significativo na força axial a desenvolver-se durante aquecimento.

### 3.8.2. Comportamento termo-hidráulico das estacas de energia

Dentro dos estudos termo-hidráulicos se encontra uma diversidade de autores que realizaram ensaios de resposta térmica a estacas trocadoras de calor. Desde o ano 1994 com Marino & Oka se apresentaram resultados de medição de temperatura e a eficiência na troca de calor com a influência hidráulica no sistema de estaca. Na Tabela 3.5 são mostrados vários autores da literatura referente ao comportamento termo-hidráulico de estacas de energia.

Tabela 3.5 - Autores que estudaram o comportamento termo-hidráulico de estacas de energia. (Bourne-Webb, 2015).

Referência	Localção	Dimensões da estaca De x Le [m]
Morino & Oka (1994)	Funabashi, Japão	0.40 x 20
Nagano et al. (2005)	Hanamaki, Japão	0.15 x 8.0
Sekine et al. (2005)	Chiba, Japão	1.50 x 20
Hamada et al. (2007)	Sapporo, Japão	0.30 x 9.0
Gao et al. (2008)	Shanghai, China	0.60 x 25.0
Wood et al. (2009)	Burton-on-Trent, UK	0.30 x 10.0
Brettman et al. (2010)	Richmond, EEUU	0.30 x 18.0 0.45 x 18.0
Jalaluddin et al. (2011)	Cidade Saga, Japão	0.14 x 20
You et al. (2014)	Beijing, China	0.42 x 18
Loveridge et al. (2013)	Londres, UK	0.30 x 27.0
Murphy et al. (2014)	Colorado Springs, EEUU	0.61 x 15.0
McCartney & Murphy (2012)	Denver, EEUU	0.91 x 14.0
Narsilio G. et al. (2015)	Córdoba, Argentina	0.60 x 9.50

Em seguida, são mostradas duas pesquisas de estacas consideradas importantes dentro da literatura de estudos termo-hidráulico de estacas de energia: Morino & Oka (1994) que realiza uma pesquisa relacionada com estacas de aço, Hamada et al. (2007) quem realiza medições em estacas de concreto com vazio interno e executadas com cravação e Sekine et al. quem trabalharam em um estudo de medição térmica com uma estaca de concreto pre-escavada.

- **Morino & Oka (1994)**

O objetivo do estudo de Morino & Oka (1994) foi esclarecer as características de troca de calor de estacas de aço quando o solo é utilizado como fonte de calor com bombas de aquecedoras ou como o dissipador de calor para a liberação de calor. Eles mostraram os resultados experimentais da liberação de calor e coleção quando a água quente ou fria circula em uma estaca de aço (Morino & Oka, 1994). Também se verificam os resultados obtidos com os resultados experimentais de um modelo de cálculo que foi desenvolvido como um meio para projetar um sistema de aproveitamento de calor utilizando essas estacas. Calculou-se também a quantidade de calor trocada com a estaca de aço numa operação de longo prazo usando um método de cálculo verificado pelo ensaio de curta duração. Este estudo baseou-se nos resultados de experimentos de curto prazo realizados no verão e inverno de 1987, para cerca de 10 dias, e esclareceu as características básicas de troca de calor de calor coleção diária e liberação de uma única estaca de aço (Morino & Oka, 1994).

Como resultados do estudo, os autores mostram que existe uma variação de temperatura na água que se encontra dentro da estaca ao longo da profundidade antes do funcionamento da bomba. Quando a água circula, as temperaturas medidas a nível superficial e no fundo podem ter uma diferença de 1 a 1.5 °C (Morino & Oka, 1994). Também se demonstrou que a diferença entre as medições e os cálculos da quantidade de calor foi, em termos de quantidade de transferência de calor entre a estaca de aço e o solo, 5-25% durante o tempo de liberação de calor, e 5-10% durante a coleta de calor, e em termos do calor coletado pelo sistema (Morino & Oka, 1994). Finalmente os autores concluem que para a realização prática de liberação de calor e de recolha com o solo, é necessária uma avaliação ao longo prazo suportado por verificações e estimativas ao longo de vários anos.

- **Hamada et al. (2007)**

A pesquisa publicada por Hamada et al. no ano 2007 visa clarificar os efeitos da aplicação do sistema de estaca de energia como estacas pré-fabricadas (estacas tipo PHC) em edifícios aplicados como permutadores de calor com ar-condicionado. Realizou-se esta pesquisa para reduzir o custo de funcionamento dos trocadores de calor em sistemas de aproveitamento de energia térmica superficial. As estacas utilizadas para a investigação foram 26 estacas de 30 cm de diâmetro exterior e 23 cm de diâmetro interior (Hamada et al., 2007).. Foram monitoradas 3 tipo de estacas com diferentes sistemas de tubulação dentro da estaca: um sistema com tubulação U simples com ar dentro da estaca, outro sistema com tubulação

---

duplo U em contato com água e parte de ar dentro da estaca e por último uma tubulação dupla em contato direto com água dentro da estaca.

Dentro dos resultados que se obtiveram, se determinou que o melhor comportamento térmico e de eficiência térmica foi para o sistema de estaca com tubulação dupla em contato com água. Dentro das considerações de funcionamento do sistema para o longo prazo com variações de temperaturas típicas. A análise se realizou para um período de 131 dias (entre o 2000-2001) e com este modelo se obteve como resultado um alto valor do coeficiente COP e sempre um alto gradiente de temperatura entre a temperatura de entrada na estaca e a temperatura de saída (Hamada et al., 2007).

Como conclusões foi escolhido o sistema U simples como o sistema economicamente viável e de fácil construção e se verifica que os resultados de troca de calor para este sistema são de grande ajuda para suprir até um 90% da energia que utilizaria um sistema convencional com a análise de longo prazo (Hamada et al., 2007)..

- **Sekine et al. (2005)**

Nesta pesquisa os atores K. Sekine, R. Oka, S. Hwang, Y. Nam & Y. Shiba de diferentes universidades de Japão desenvolveram um sistema de estaca trocadora de calor executada "*cast-in-place*" para fundação de edifícios. Nesta pesquisa, se realizou um experimento em grande escala já que as dimensões da estaca de 1.5 m de diâmetro e 20 m de profundidade permitiram colocar 8 tubulações de HDPE ao redor da estrutura de concreto. A capacidade de permuta de calor deste sistema, as mudanças de temperatura subterrâneas e desempenho da bomba de calor foram investigados. Além disso, os custos de construção desse sistema também foram examinados durante a pesquisa.

Como resultado, se obteve um rendimento de coleta/injeção de calor de 180 W/m para cada estaca. Foi realizado um estudo em diferentes ambientes empregando um sistema de panel de radiação e uma unidade de ventilação (ar-condicionado), ambas ligadas a diferentes estacas de energia com as mesmas características geotécnicas e estruturais, e se concluiu que existem diferenças máximas de temperaturas entre o ar e a água de 12.3 °C quando esfria e de 12 °C quando aquece o ambiente. A estaca com unidade de ventilação teve uma taxa de injeção de calor média de 100 W/m entanto a estaca ligada ao sistema de radiação de 120 W/m, e 44 W/m e 52 W/m para extração de calor respectivamente. No estudo de custo se concluiu que

uma estaca de energia com 8 tubulações foi até 10 vezes mais barata que construir um poço trocador de calor com uma tubulação só.

### 3.8.3. Resposta térmica de estacas de energia

A partir de diversas pesquisas experimentais mostradas anteriormente, se iniciaram investigações de ordem numérica para estudar o comportamento de sistemas paralelos aos experimentados. Análises paramétricas de estacas foram importantes num maior detalhamento do comportamento das estacas de energia. Em seguida, são mostrados alguns autores que estudaram a resposta térmica e modelos paramétricos de estacas trocadoras de calor.

Tabela 3.6 - Autores que estudaram estes de resposta térmica. (Bourne-Webb, 2015).

Referência	Localização	Parâmetros
Brandl (2006)	Viena, Áustria	-
Loveridge et al. (2014)	Londres, UK	-
Murphy et al. (2014)	UAFA, EEUU	Diferença de Temperatura e número de tubulações
You et al. (2014)	Beijing, China	Temperatura entrada/saída
Murphy & McCartney (2014)	UAFA, EEUU	Tubulação, comprimento, separação da tubulação.
Bandeira L. (2015)	São Carlos, Brasil	Diâmetro da estaca, Temperatura entrada/saída, vazão.

Tabela 3.7 - Autores que estudaram modelos paramétricos de ensaios TRT

Referência	Localização	Parâmetros
Bidarmaghz et al. (2013)	Melbourne, Austrália	Numero de tubulações, vazão, tipo de tubulação, separação entre tubulações e entrada/saída.
Francesco Cecinato & Fleur A. Loveridge (2015)	Londres, UK	Diâmetro da estaca, diâmetro da tubulação, número de tubulações, velocidade, comprimento da estaca, condutividade do concreto, cobertura do concreto.

- **Bidarmaghz A., Narsilio G., Johnston I (2013):**

O objetivo desta investigação foi avaliar e analisar os efeitos térmicos em relação à troca de calor em uma estaca de energia devido à variação de parâmetros como configuração

do sistema de tubulação, a vazão do fluido e o espaçamento entre tubulações. Os autores qualificam como parâmetros de projeto que podem afetar a eficiência do sistema. Foram realizados modelos 3D que posteriormente se resolveram por meio dos Métodos de Elementos Finitos. Os modelos consistiam em estacas de 0.46 m (com tubulação em espiral) e 0.14 m (U simples e duplos) de diâmetro com 30 m tubulação em HDPE de 0.025 m de diâmetro e 0.003 m de espessura. Os casos de configurações modeladas foram circuitos tipo U simples, duplo U (cruzados ou em paralelo), triplo U e espiral.

Dentro dos resultados obtidos descobriu-se que como a média da taxa de fluxo de água na tubulação aumenta, a taxa de extração de calor primeiro tende a aumentar para todas as configurações GHE. Se observou que acima de uma velocidade de fluxo determinada, o fluxo tornou-se turbulento e se incrementou à taxa de extração de calor, enquanto que o fluxo diminuiu em comparação ao regime laminar, a taxa de extração de calor diminuiu de igual forma. Assim as taxas de fluxo mais elevadas não resultaram necessariamente num aumento significativo na eficiência do sistema. Finalmente, se observou que existe um estado constante na taxa de extração de calor no regime transicional que se logra observar em sistemas duplo U.

Para este caso, os autores concluem, que a adição de um segundo da tubulação em U não dobra o desempenho térmico, mas atinge entre 40% a 90% de desempenho adicional, dependendo do volume da água em contato com o calor do sistema. No entanto, a economia pode ser alcançada em termos de custos de perfurações, tendo em conta a redução no número total ou de comprimento GHEs do que seria necessário com um único da tubulação em U. A comparação da tubulação duplo U e configuração de U cruzada mostram que o circuito duplo U paralelo realiza cerca de um 23% de melhor operação quanto o fluxo de água está em regime turbulento, entanto em um regime laminar eles tem quase o mesmo desempenho, para as separações apresentadas.

Por outro lado, na são mostrados os resultados térmicos da tubulação em espiral. Os autores conseguiram obter resultados que mostram que a temperatura de saída, ao aumentar o espaçamento axial, diminuiu, mas a taxa de troca de calor é quase constante para todos os casos. Também, foi comparado o desempenho térmico entre os GHEs com tubulações em espiral e tubulação em U. Demonstrou-se que para uma dada taxa total de fluxo de água, em GHEs de mesmo comprimento têm-se quase o mesmo desempenho térmico independentemente da geometria da tubulação e do número de tubulações em U. Os autores

recomendam, portanto, usar várias tubulações U em vez de tubulação em espiral. Por último, se conclui que existem variações na troca de calor relacionadas com a separação de tubulações tipo U e como isso afeta a taxa de extração de calor. As variações do espaçamento entre  $S_s = 0,04$  m e  $S_L = 0,28$  m em uma estaca de diâmetro 0.46 m tiveram como resultado, na taxa de extração de calor, o aumento de 7% para 23% aproximadamente.

- **Francesco Cecinato & Fleur A. Loveridge (2015):**

Na pesquisa conduzida por Francesco e Loveridge em 2015, se desenvolve um modelo numérico de elementos finitos para a análise 3D aplicada a fenômenos de troca de calor condutivo e convectivo transiente. O modelo é empregado para proceder a uma análise paramétrica para identificar os fatores principais na maximização da eficiência energética da estaca.

A influência da mudança de condutividade do concreto, o diâmetro da estaca e a cobertura de concreto, também são discutidos à luz das suas implicações energéticas. A vazão de fluido não surge como um fator importante na eficiência energética, desde que seja suficiente para garantir o fluxo turbulento.

Os parâmetros utilizados para a simulação paramétrica variaram desde um valor inferior limite até um valor superior. Os intervalos são apresentados na Tabela 3.8. Segundo os autores, esta análise não é relevante para escavações CFA (Hélice Continua), onde as tubulações U são normalmente instalados separadamente do reforço, mais perto do centro da estaca para permitir a instalação dos GHEs.

Para esta análise paramétrica, foi implementado um método de análise paramétrico estatístico. A análise de Taguchi define uma "matriz ortogonal" de 2 dimensões que determina as configurações variáveis para cada um dos experimentos necessários. Cada fila da matriz contém a lista de configurações para todos os parâmetros em um experimento. Cada coluna corresponde a uma das variáveis, e contém todos os valores que cada variável tem atribuído durante os modelos.

Tabela 3.8. Intervalos selecionados para a simulação paramétrica.  
(Cecinato & Loveridge, 2015).

	Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior	Unidades
1	Diâmetro da estaca	500	1000	mm
2	Diâmetro da tubulação	20	30	mm
3	Numero de Tubulações	2	6	
4	Velocidade do Fluido	0.2	1.2	m/s
5	Comprimento da estaca	15	25	m
6	Condutividade térmica do concreto	1.5	3	W/m.K
7	Cobertura do concreto	50	75	mm

Finalmente, confirma-se que o parâmetro de concepção mais influente na eficiência de trabalho é o número de tubulações, que pode ser mais convenientemente aumentada, dentro de um intervalo razoável, em comparação com o aumento das dimensões da estaca.

Dentro das observações apreciadas pelos autores se conclui:

- O melhor cenário para a eficiência energética de uma estaca geotérmica é representado pela combinação de parâmetros escolhidos para a execução de confirmação onde o parâmetro mais importante é o número de tubulações, seguido pelo comprimento estaca. Este resultado concluiu que o valor total da superfície da tubulação disponível para a troca de calor por convecção é fundamental.
- A condutividade térmica do concreto vem em terceiro lugar no ranking de parâmetro importância. Embora isto seja um resultado esperado, a condutividade não pode ser facilmente manipulada. A condutividade do concreto depende principalmente da litologia do agregado e isso poderia potencialmente ser especificado pelo projetista. Na prática, os tipos de agregados são principalmente determinados pelos materiais disponíveis localmente. No entanto, os aditivos e produtos de substituição de cimento podem reduzir a condutividade do concreto e estes produtos poderiam ser limitados pela especificação.

### **3.9. ENSAIOS DE RESPOSTA TÉRMICA PARA ESTACAS TROCADORAS DE CALOR RELIZADOS EM SÃO CARLOS, SP.**

Ensaio de resposta térmica em 2 estacas trocadoras de calor foram realizadas no campo experimental da Universidade de São Paulo -EESC na cidade de São Carlos localizada

no estado de São Paulo, Brasil. Em total foram realizados 5 ensaios em estacas de 25 cm e 50 cm de diâmetro e 12 m de comprimento. Os ensaios tiveram tempos de duração de 48, 72 e 229 horas. Utilizaram-se tubulações tipo U em HDPE para realizar a avaliação térmica dos sistemas de estaca. Em seguida se mostra a Tabela 3.9 com o resumo das descrições das estacas e os ensaios realizados.

Tabela 3.9. Descrição dos ensaios TRT realizados (Neto, 2015)

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

Para realizar os ensaios, foram monitoradas variáveis como a temperatura e a variação do nível de água no solo circundante durante 5 meses antes de realizar os ensaios. O comportamento das variáveis é ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8.

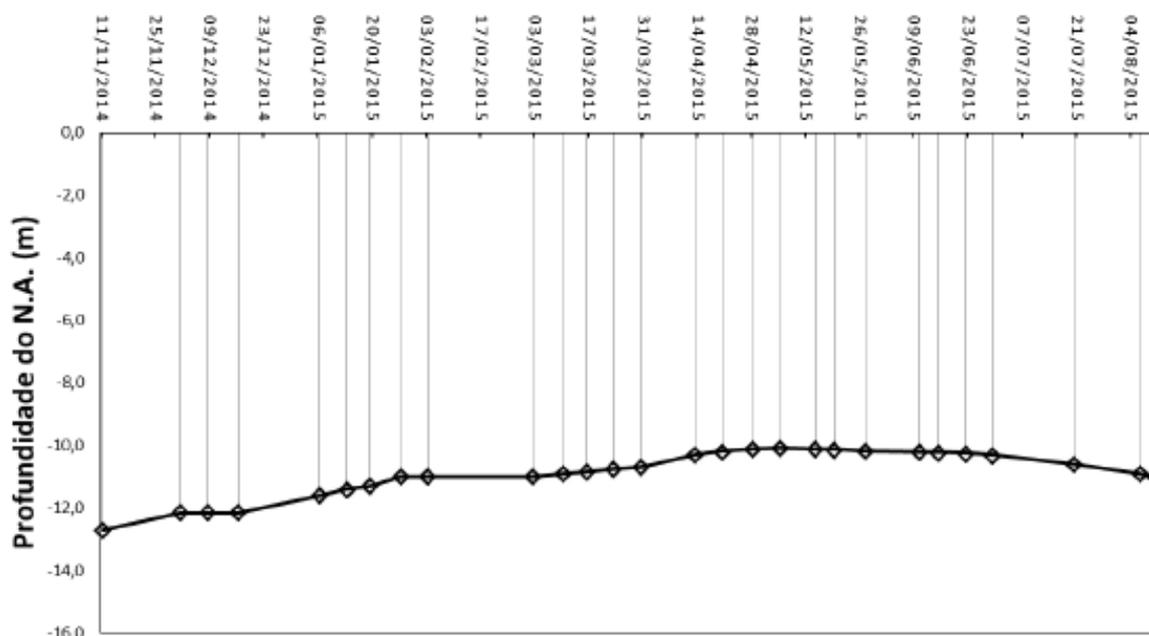


Figura 3.7 - Nível de água no solo do Campo Experimental da EESC (Neto, 2015)

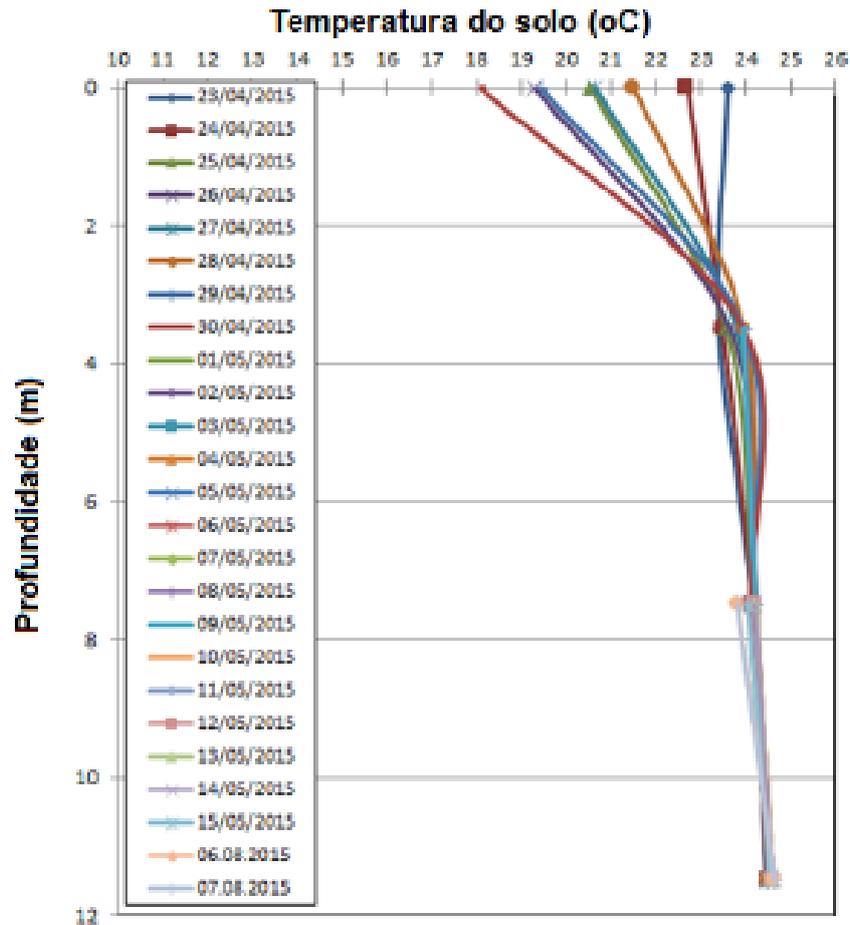


Figura 3.8 - Temperatura do solo no Campo Experimental da EESC (Neto, 2015)

Os resultados das propriedades térmicas em cada ensaio se mostra na Tabela 3.10, onde se consegue a taxa de troca de calor experimental, a resistência e a condutividade térmica dos sistemas de estacas trocadoras de calor propostos.

Tabela 3.10. Propriedades térmicas obtidas nos ensaios TRT (Neto, 2015)

Ensaio	Diâm. da estaca (m)	"U" loop	"Duração (horas)	Nível 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	single	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	double	229	-11.0	26	4.2	110	0.08

Algumas conclusões relativas ao comportamento térmico de estacas trocadoras de calor após realização de ensaios TRT em São Carlos por Neto (2015) foram:

- 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), porém não foi possível quantificar o quanto que cada um dos efeitos proporciona de aumento separadamente. Para isso seria necessária 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 faz variar os resultados de taxa de troca de calor e de 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) chegou a aumentar a temperatura do solo em um raio de 2m do eixo da estaca.
- Os ensaios TRT realizados na EESC – USP para esta pesquisa foram os primeiros ensaios TRT realizados no Brasil. No entanto, os resultados encontrados ficaram dentro da faixa de variação encontrada em diferentes locais do mundo.

### **3.10. PARÂMETROS MONITORADOS DURANTE O ENSAIO TRT-1**

Posteriormente se mostram os resultados de parâmetros monitorados durante o ensaio de resposta térmica que foram inseridos posteriormente no software COMSOL como funções de entrada para condições iniciais e de contorno do modelo numérico.

- *Temperatura inicial do solo:* os valores de temperatura nas profundidades de 3.50 m, 7.50 m e 11.5 m antes de começar o ensaio foram monitorados por sensores de temperatura durante 3 meses (termistores) e se registraram temperaturas de 24°C (297.15 K), 24.1°C (297.25 K) e 24.2°C (297.35 K) respectivamente mostrados na Figura 3.8.
- *Temperatura ambiente:* a temperatura que atua na superfície foi monitorada por meio de sensores de temperatura no ambiente e o resultado ao longo do ensaio se observa na Figura 3.9.

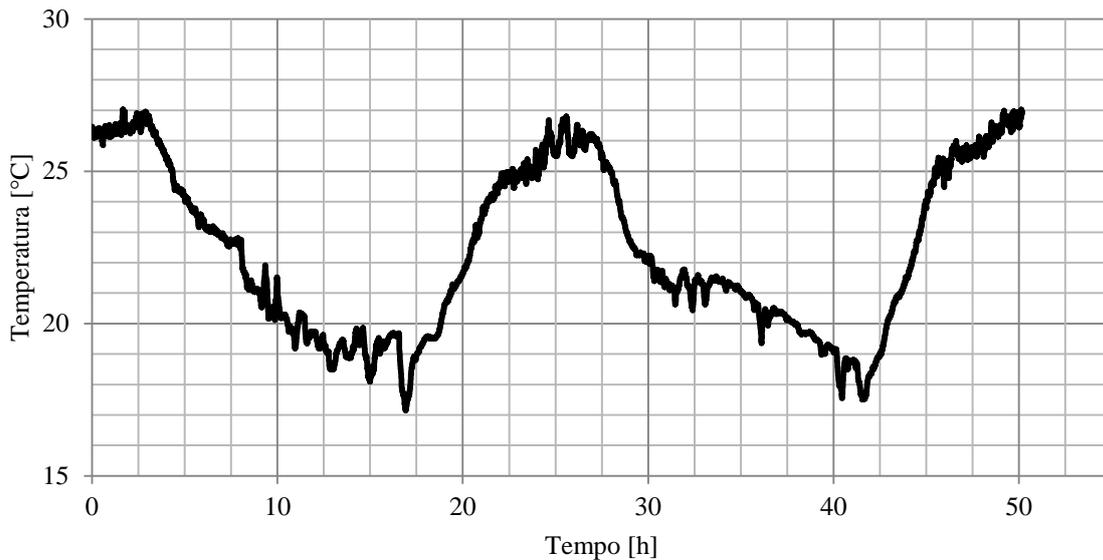


Figura 3.9 - Variação da temperatura superficial monitorada durante o TRT (Neto, 2015).

- *Temperatura da água na entrada da estaca:* a temperatura do fluido na entrada também se monitorou durante o TRT por meio de sensores de temperatura incorporados na entrada da estaca. O comportamento da temperatura se ilustra na Figura 3.10.

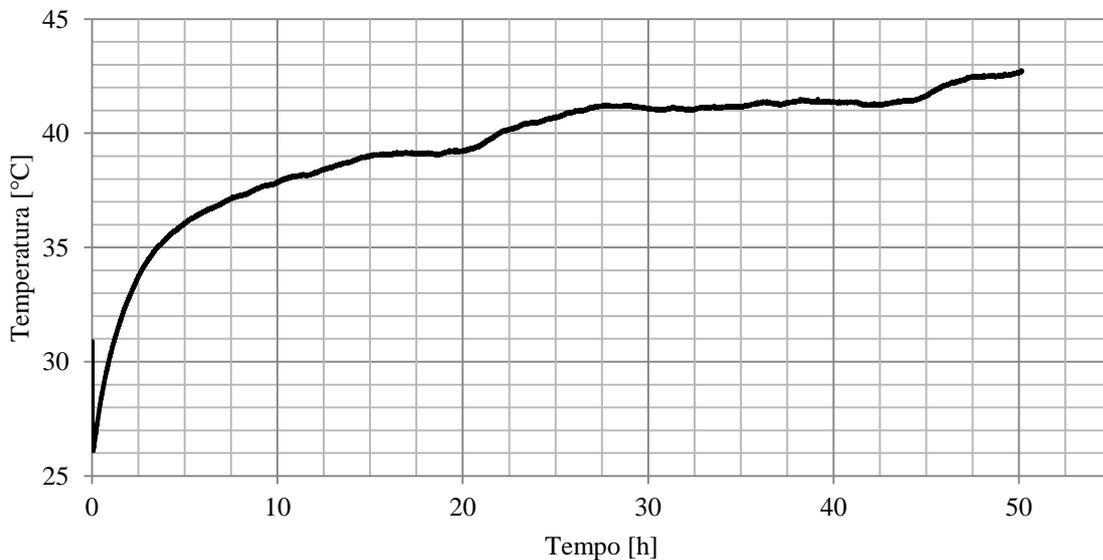


Figura 3.10 - Temperatura do fluido de na entrada da estaca durante o TRT. Ver ANEXO C (Neto, 2015).

- *Vazão na entrada da estaca:* se monitorou um fluxo turbulento com medidores de vazão eletrônicos na saída do tanque aquecedor durante todo o ensaio. Registrou-se uma vazão média de 27.8 l/min com comportamento ao longo do tempo mostrado na Figura 3.11.

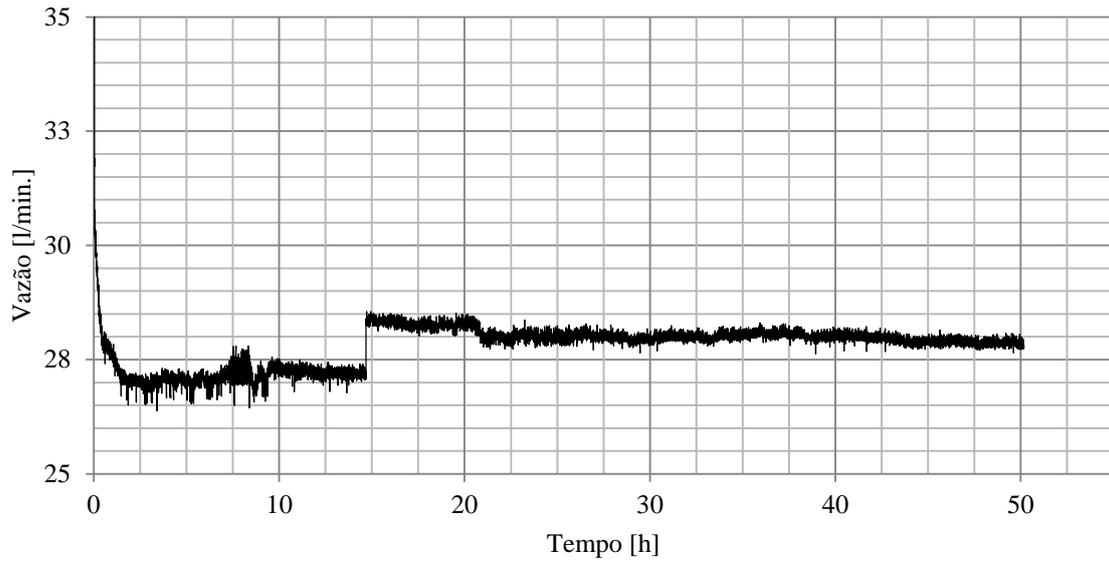


Figura 3.11 - Vazão registrada na entrada da estaca (Neto, 2015).

---

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo numérico de ensaios TRT faz parte de um projeto de investigação proposto e respaldado principalmente pela Universidade de São Paulo e financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). O projeto de investigação principal tem como objeto de estudo a avaliação do comportamento hidro-termo-dinâmico de estacas trocadoras de calor submetidas a um clima subtropical. Desse modo a investigação se divide em dois temas bases: o comportamento termo-hidráulico que aponta a ensaios TRT, e também, ao comportamento termo- hidro-mecânico que aponta a ensaios TRT complementado com prova de carga. A presente pesquisa toma como objeto principal de estudo o comportamento termo-hidráulico de uma estaca de energia que se divide em dois trabalhos que vão conjuntamente se desenvolvendo: o trabalho de dissertação focado nos ensaios experimentais do TRT realizado pelo aluno de mestrado Luís Antônio Bandeira Neto e orientado pela Professora Cristina Tsuha da Universidade de São Paulo (EESC), e o trabalho de dissertação que desenvolve a modelagem numérica de um desses ensaios TRT como objeto de estudo para determinar condições ótimas de trabalho e que se desenvolve orientado pelo Professor Renato Cunha da Universidade de Brasília (UnB). Os resultados experimentais são encontrados no trabalho titulado *Estudo da Resposta Térmica de Fundações por Estacas Trocadoras de Calor em Solo não Saturado* (Neto, 2015).

Assim, com os resultados fornecidos pelo trabalho experimental, são determinadas as funções de comportamento térmico e hidráulico monitoradas durante o ensaio, como também, as variáveis de entrada que fazem parte da informação de entrada ao software COMSOL Multiphysics e de desenvolvimento da parte numérica.

Finalmente, também se realiza uma análise da resposta térmica da estaca considerando a separação entre sistemas de estacas trocadoras de calor. Neste estudo se modelam duas estacas variando a separação das mesmas comparando-se o resultado de uma delas com o modelo numérico padrão (sem alterações).

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO TRT

A investigação do comportamento termo-hidráulico de uma estaca de energia consistiu em se realizar um ensaio TRT a uma estaca trocadora de calor. Em seguida, se descreve brevemente como foi realizado este ensaio de resposta térmica para entender a partir dele o modelo numérico que representa a mesma situação experimentada. Por isto, a partir da descrição do ensaio e a apresentação de resultados de variáveis medidas antes e durante o

ensaio também se mostram os parâmetros e variáveis térmicas que foram monitoradas e que são ferramentas para formar as condições iniciais e de contorno do modelo numérico.

#### **4.1.1. Descrição do ensaio TRT**

O ensaio TRT realizado no campo experimental USP/EESC foi utilizado como objeto de estudo da presente pesquisa que consta de uma estaca de 12 m de comprimento e 25 cm de diâmetro foi escavada a seco e fabricada em concreto e um equipamento fabricado na mesma universidade. O sistema de estaca conformou-se de uma tubulação tipo U simples em material HDPE de 2.54 cm de diâmetro (1 in) e 3mm de espessura. De modo geral, o teste de resposta térmica consistiu em uma prática com um tempo aproximado de 48 horas no qual se utilizou uma bomba aquecedora com 1000 W de potência e uma bomba hidráulica de 0.5 cavalos de força (Neto, 2015). Precisaram-se sensores de temperatura tanto na entrada e saída da estaca como ao longo da profundidade do solo, localizados a 3.5 m, 7.5 m e 11.5 m de profundidade.

Os ensaios TRT se realizaram de acordo com os procedimentos indicados nos mais diferentes artigos da literatura, mas sua principal base foi o Eurocode CEN/TC 341 N525 2011. Por este motivo o ensaio deve ter um tempo mínimo de realização de 48 horas segundo a normativa. (Neto, 2015).

Para a realização do ensaio, foi necessário saber a temperatura média do subsolo em todo o comprimento de estaca, e ela pode ser determinada de duas formas (Neto, 2015):

- 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.

Neto (2015) descreve que antes de se iniciar o ensaio se circulava água por pelo menos meia hora para determinar a temperatura média do subsolo. Depois de concluir esta etapa, o aquecedor foi ligado e o monitoramento do ensaio começou. O aquecedor era ligado com potência aproximadamente constante. O Eurocode determina que as primeiras horas de ensaio devam ser descartadas, desse modo 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.

Durante todo o ensaio o aquecedor permaneceu ligado, e os parâmetros para avaliação do mesmo se consideraram as temperaturas de entrada e saída, a temperatura ambiente medida fora do container por meio e a temperatura do subsolo medida logo antes da realização do ensaio, todas elas medidas a partir de sensores de temperatura. Foi monitorada também a vazão na entrada da estaca por meio de um medidor digital de vazão para garantir que a mesma permaneceu no regime turbulento por todo o ensaio. Todos estes sensores e medidores foram vinculados a um sistema de aquisição de dados que registrava e guardava os dados medidos em uma base de dados determinada para o ensaio TRT (Neto, 2015).

Em seguida se mostra a Figura 4.1 que ilustra o esquema geral do ensaio TRT realizado no campo experimental da Universidade de São Paulo-EESC.

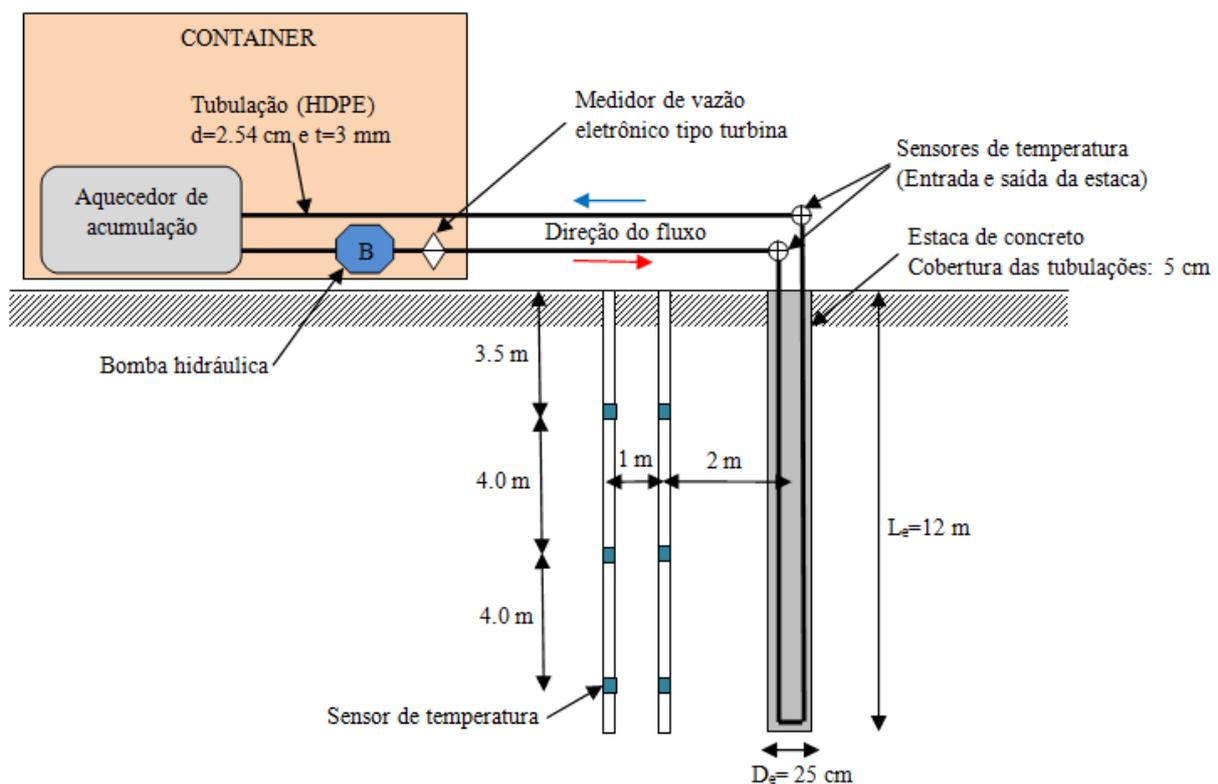


Figura 4.1 – Esquema do ensaio TRT

Alguns registros fotográficos da fase experimental são mostrados na Figura 4.2 que ilustram algumas das fases de fabricação da estaca, a montagem e instalação do sistema trocador de calor e alguns elementos que fazem parte do equipamento TRT ilustrados também na Figura 4.1.



Figura 4.2 – Estaca, o sistema de bomba de calor e elementos TRT (Neto, 2015)

Onde:

- a) Instalação de tubulações dentro da perfuração correspondente à estaca
- b) Tubulação tipo “U simples” ligada no reforço de aço
- c) Tubulações isoladas termicamente saindo do container
- d) Sensores de temperatura na entrada e saída da estaca com tubulações isolada termicamente.
- e) Aquecedor de acumulação com 1000 W de potência (sistema com tanque)
- f) Conexão de tubulações na entrada e saída do aquecedor. Bomba hidráulica conectada na saída do aquecedor (azul) e medidor de vazão elétrico (na direita da bomba hidráulica).

#### 4.2. INFORMAÇÃO GERAL DA LOCAÇÃO DO ENSAIO

A estaca testada localiza-se no campus universitário da Universidade de São Paulo- EESC. A Universidade se localiza no centro da cidade de São Carlos, SP (22°01'22” S, 47°53'38” W) como se mostra na Figura 4.3.

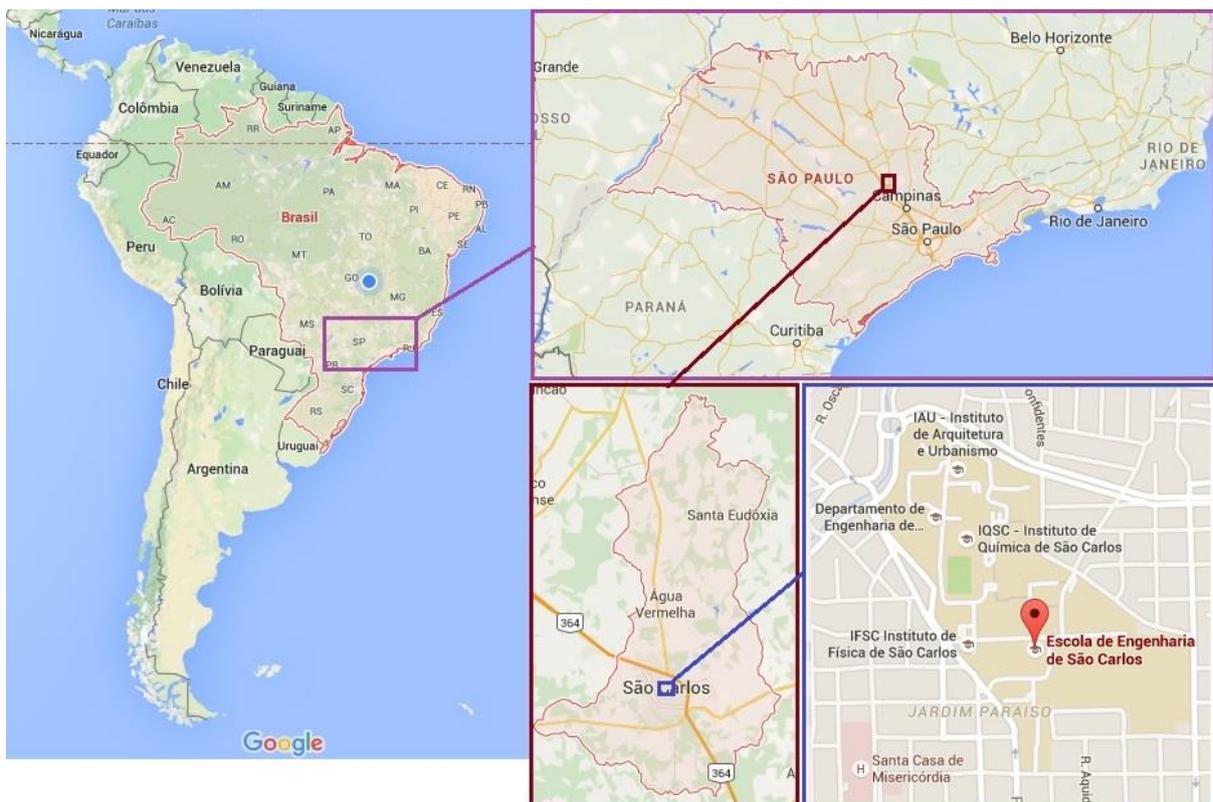


Figura 4.3 - Localização da Universidade de São Paulo- EESC.

A estaca trocadora de calor se localiza no campo experimental de fundações do Programa de Pós-graduação em Geotecnia. A estaca isolada foi fabricada num sitio especial

onde os efeitos e resultados térmicos do sistema não se perturbem com estruturas já existentes na área de trabalho. Devido a isto, a estaca se fabrica na parte noroeste do campo experimental, onde se garante o isolamento térmico da estrutura. Na Figura 4.4 se ilustra de maneira aproximada a locação da estaca trocadora de calor dentro do campus experimental de fundações (EESC).

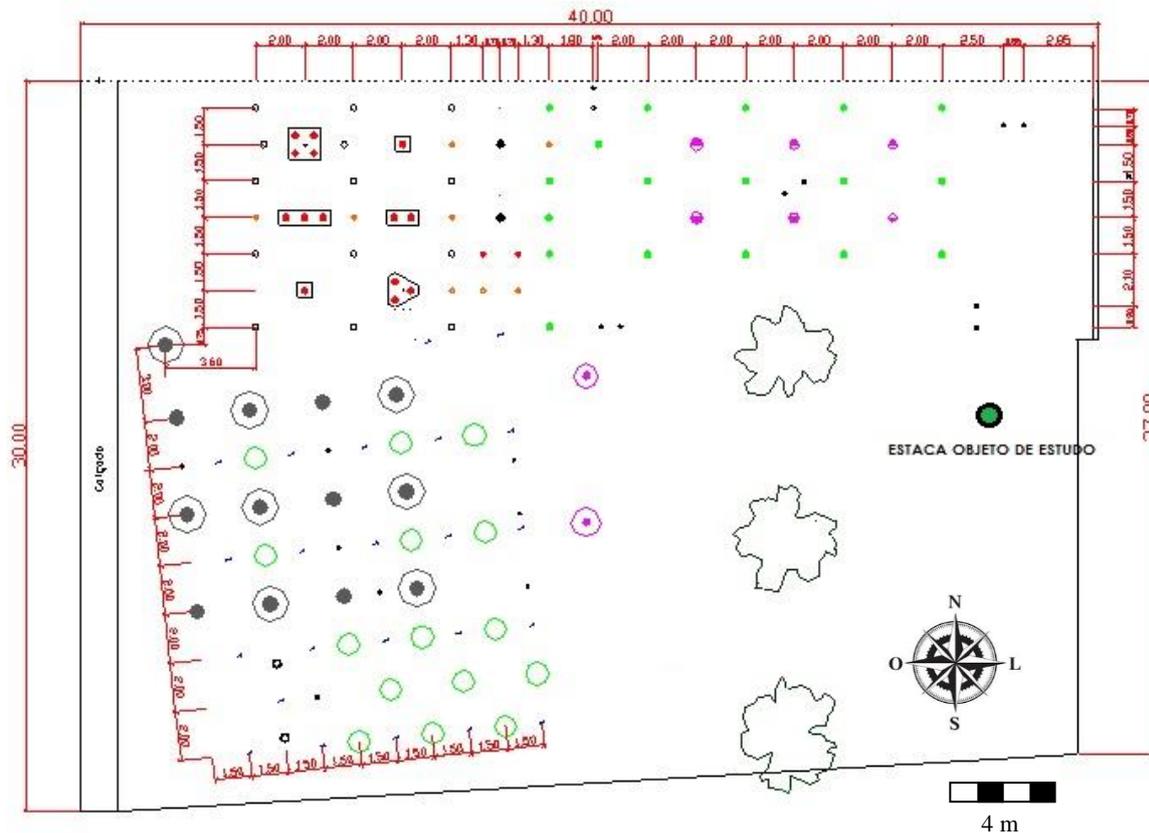


Figura 4.4 - Locação da estaca de estudo no campo experimental de Fundações USP/EESC. (<http://www5.eesc.usp.br/sgs/campfund.htm>)

#### 4.2.1. Geologia e caracterização geotécnica do solo

A locação do Teste de Resposta Térmica se caracteriza por uma geologia formada por rochas do Grupo São Bento, constituídos de arenitos da formação Botucatu e migmatitos básicos da formação Serra Geral (ver Figura 4.5). Sobre estas formações estão assentados conglomerados e arenitos que pertencem ao grupo Bauru que são cobertos por uma camada de sedimentos Cenozoicos (Machado, 1998). Na Tabela 4.1 é mostrado o conteúdo de areia, silte e argilas apresentadas em amostras de solo da locação. São caracterizadas amostras em correspondentes a 3, 5 e 8 metros de profundidade para este fim.



#### 4.2.2. Perfil do solo e propriedades dos materiais

De acordo a informação apresentada no relatório "Campos experimentais Brasileiros" (2006) e ensaios SPT realizados neste campo experimental, o perfil de solo que será estudado nas simulações, apresentado na Figura 4.6, tem a seguinte estrutura:

- Camada de sedimentos composta por areia fina e média argilosa marrom de 6.40 m de espessura aproximadamente;
- Linha de Seixos com espessura de 0.10 a 0.50 metros aproximadamente. Para os modelos desta dissertação se tomará um valor de 0.50 metros de espessura da camada;
- Camada de areia fina argilosa que atinge uma profundidade de 24 m. Dividido em duas subcamadas: Solo residual composto por uma areia fina argilosa avermelhada de 6.1 m de espessura aproximadamente, seguida por um saprolito de areia argilosa variegada de 11 m aproximadamente;
- Finalmente, uma camada de silte argiloso variegado de compacto a muito compacto.

O nível freático reportado nas sondagens se localiza entre os 7 a 10 metros de profundidade dependendo da época do ano (Machado, 1998). Para esta dissertação, o nível freático é constante e localizado a 10 metros de profundidade.

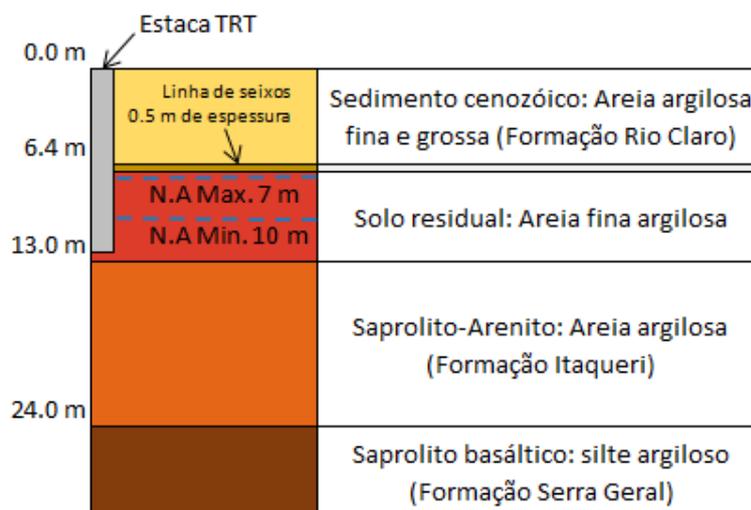


Figura 4.6 - Perfil de solo localizado no Campo experimental USP/EESC.

Com a condição de que existe uma camada rija na estratificação de solo (saprolito), esta restringe perfurações ainda mais profundas, pelo qual também se confina uma análise em profundidades maiores devido a esta limitação. Este motivo fundamenta o limite do

comprimento das estacas dentro análise paramétrica, considerando uma estaca com o comprimento máximo de 35 m.

- **Peso específico do solo, umidade e relação de vazios.**

Dentro dos ensaios realizados pela Universidade de São Paulo, se encontram alguns resultados relacionados com o peso específico do solo. Na Tabela 4.2, são mostrados valores de umidade, peso específico seco, peso específico *in situ* e relação de vazios do solo na locação dos ensaios. Esta informação é fornecida nos modelos para simular cada ensaio TRT e sua análise paramétrica.

Uma média definida pelos pesos específicos *in situ* em cada faixa de profundidade é realizada para definir os valores de cada camada de material do modelo. Não se considera a variação da umidade nem os efeitos térmicos que variem o peso específico com o tempo.

Tabela 4.2 - Pesos específicos, umidades e relação de vazios do solo (Machado, 1998).

Profundidade [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
$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	12.5	13.6	13.8	14.3	14.4	14.7	15.2	16.1	16.6
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	14.2	15.6	16	16.7	14.8	17.1	18.1	18.1	19.6
$e$	1.17	0.99	0.96	0.90	0.88	0.84	0.78	0.68	0.63

Além da informação apresentada, o solo basáltico encontrado a 24 m de profundidade identificado como silte argiloso, se apresenta com peso específico entre 18 kN/m<sup>3</sup> e 20 kN/m<sup>3</sup> com índice de vazios entre 0.8 e 0.87 segundo informação apresentada por Perazzolo (2003) ao referir-se a solos saprolíticos ou residuais de basaltos do grupo Serra Geral para estudos de taludes na bacia de Paraná. Para este caso, extrapolam-se valores deste tipo de solo devido à falta de informação da área de estudo. Assim, para efeitos de resultados se assume um solo totalmente saturado devido ao fato de que o mesmo que se encontra embaixo do nível freático de água. Toma-se como valor de umidade a media de umidades de amostras adotadas para este tipo de solo segundo Peixoto (2001).

#### 4.2.3. Climatologia

Segundo o Centro de Pesquisa Meteorológico e Climático Aplicados a Agricultura do Brasil (CEPAGRI), na cidade de São Carlos se registram temperaturas médias ao longo do ano que variam entre 12°C e 28°C. A Figura 4.7 ilustra o comportamento geral da temperatura na cidade ao longo do ano, obtidas mediante a medição em anos anteriores. Pode-se distinguir

na Figura 4.7 a temperatura do mês de Agosto. A temperatura média corresponde a 20°C, com valor mínimo de 13°C e máximo de 27°C.

Nota-se que a temperatura máxima nesta cidade se apresenta nos meses de verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), com umidades relativas máximas de até 76% e precipitações máximas de 268 mm por mês. As temperaturas mínimas geralmente se apresentam nos meses de inverno (Junho e Julho) com umidade relativa de 54% aproximadamente precipitação de 15.5 mm aproximadamente. Além das variáveis térmicas e de umidade, a pressão atmosférica média que apresenta a cidade é de 92.1 kPa durante o ano segundo a CEPAGRI (2015).

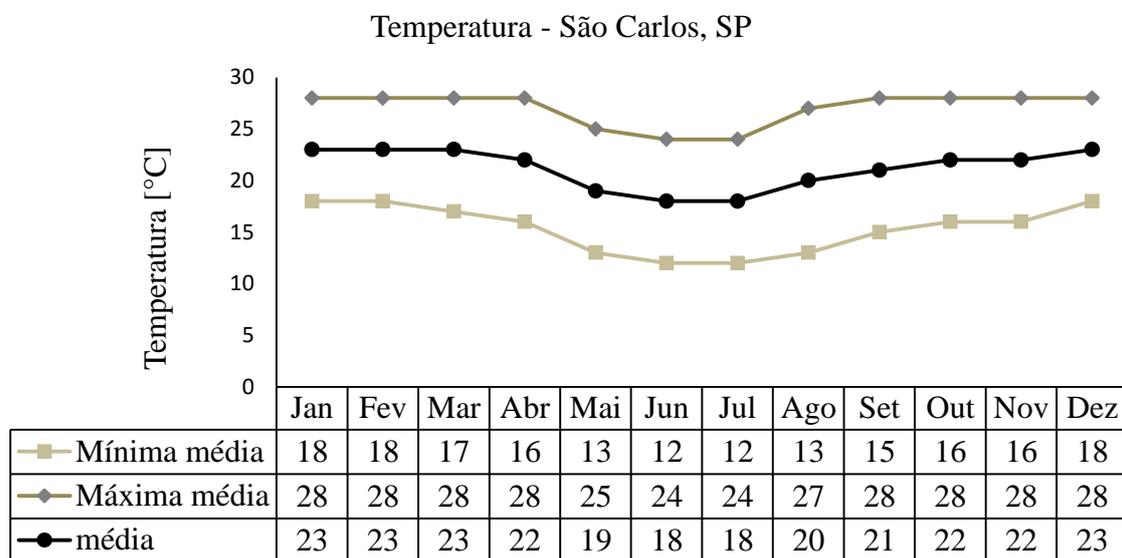


Figura 4.7 - Temperatura máxima, mínima e media do ambiente ao longo do ano na cidade de São Carlos, SP. (CEPAGRI, 2015)

#### 4.2.4. Mineralogia do solo

A mineralogia que compõe o solo da região de São Carlos está formada por frações de areia composta por quartzo e frações de argila, caulim, gibsita e óxido de ferro (Villar., Bortolucci, & Rodriguez, 1985). A Figura 4.8 mostra as frações volumétricas de minerais que conformam o solo da região de São Carlos. Por outro lado, Grim & Bradley (1963) descreve que a gibsita encontrada na zona é desenvolvida pelo caulim que poderia se formar devido a um estado intermédio da montmorillonita. Na Figura 4.8, ilustra-se a continuidade que existe entre o mineral composto por silicatos e o caulim é evidente, pelo que demonstra a hipótese de formação mineral.

Segundo Villar, Bortolucci, & Rodriguez (1985), nos sedimentos cenozoicos existe um processo de erodabilidade que faz percolar água e mobilizar sílica. Foi comprovada esta afirmação por meio de experimentos realizados em 1972 por Paraguassu, onde se reportou o predomínio de minerais silícios e grãos de quartzos que contém grande conteúdo de sílica. Os autores também mostram que estes sedimentos não são dispersivos de acordo aos resultados obtidos pelo Rodrigues em 1982.

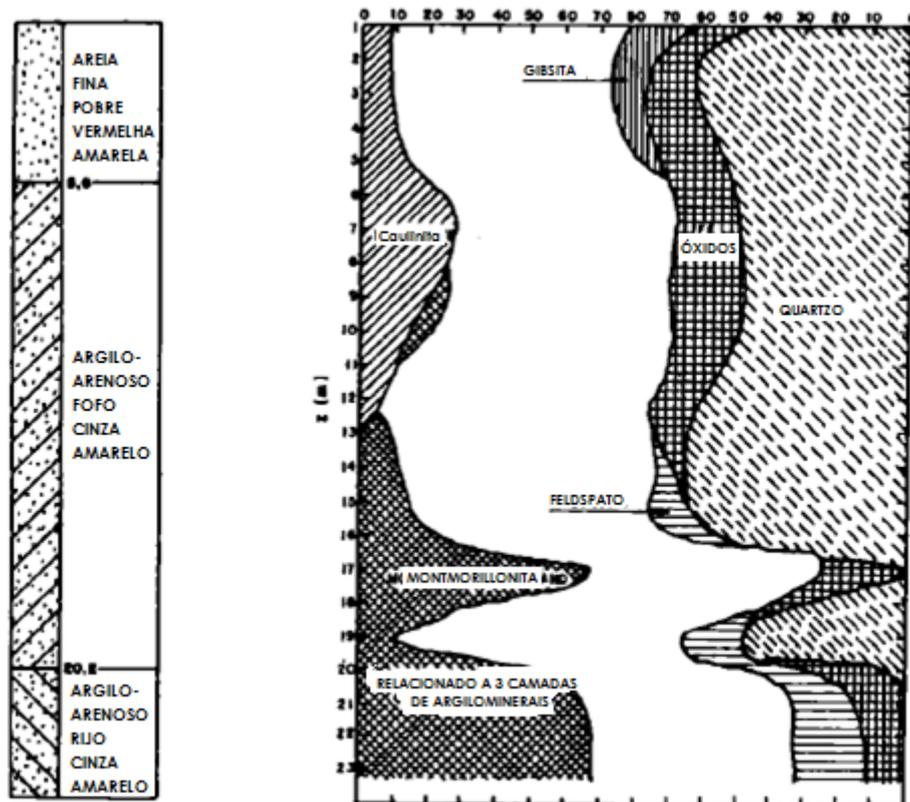


Figura 4.8 - Perfil mineralógico do solo na região de São Carlos (Vilar et al. 1985)

Para o cálculo de propriedades térmicas como a condutividade térmica em solos, é importante destacar a presença de quartzo devido ao fato que este mineral é o mais influente na transmissão de calor. Para isto, foi tomado do perfil mineralógico mostrado anteriormente pontos em profundidade com as respectivas leituras de conteúdo de quartzo mostrados na Figura 4.8. Com eles se obtém uma média da porcentagem do mineral para cada camada de solo.

Em seguida, mostra-se na Tabela 4.3 as médias do conteúdo de quartzo para cada camada.

Tabela 4.3 - Conteúdo de quartzo para cada camada de solo

Material	% Quartzo
Sedimentos	53.5
Areia fina argilosa	52.6
Areia argilosa	34.3
Silte argiloso	14.2

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO

De acordo com a informação do perfil estratigráfico, a geologia da zona, e, o conteúdo mineralógico, se determinam os valores das variáveis necessárias para se obter resultados das correlações de condutividade térmica e a capacidade de calor específica relacionados aos conceitos mostrados no Capítulo 1. Determinam-se valores médios de cada propriedade do solo mostrados na Tabela 4.2 e Figura 4.8 os quais caracterizariam cada camada de solo nos diferentes modelos. Com as propriedades anteriormente mostradas é construída a Tabela 4.4 que resume as propriedades básicas do solo, incluindo o conteúdo volumétrico de quartzo de cada tipo de solo.

Tabela 4.4 - Valores das propriedades básicas e conteúdo de quartzo dos solos

Material	$w$ [%]	$e$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$qz$
Sedimentos Cenozoicos	15.75	0.96	15.73	26.60	13.88	0.54
Linha de Seixos	19.10	0.78	18.10	27.05	15.20	0.60
Areia fina argilosa	18.30	0.63	19.60	27.01	16.60	0.52
Areia argilosa	23.50	0.78	19.10	27.47	17.20	0.35
Silte argiloso compactado	23.26	0.81	19.40	28.49	15.74	0.21

Onde  $w$  é umidade gravimétrica,  $e$  relação de vazios,  $\gamma$  peso específico médio,  $\gamma_s$  peso específico dos sólidos,  $qz$  a fração volumétrica de quartzo e  $\gamma_d$  peso específico seco do solo.

Com a informação mostrada anteriormente, procede-se determinar a condutividade térmica por meio das correlações de Kersten (1949), Johansen (1975), Côte and Konrad (2005) e Lu et al. (2007) e a respectiva capacidade térmica específica de cada camada por meio das formulações mostradas nos Itens 3.6 e 3.7.

De acordo com as diferentes formulações semi-empíricas, se apresentam nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 com o valor do parâmetro de condutividade térmica ( $k$ ) de cada tipo de solo.

Tabela 4.5 - Condutividade térmica segundo Kersten (1949)

Tipo de solo	$k$ [W/(m.K)]
Sedimentos	1.31
Seixos	1.66
Areia siltosa fina	2.01
Areia siltosa fina (sat)	2.13
Areia siltosa (sat)	2.32
Silte argiloso compactado	1.43

Tabela 4.6 - Condutividades térmica segundo Johansen (1975)

Tipo de solo	Saturação (%)	$K_{seco}$ [W/m.K]	$k_s$ [W/m.K]	$k_{sat}$ [W/m.K]	$K_e$ [W/m.K]	$k$ [W/m.K]
Sedimentos	23	0.19	6.02	1.95	0.55	1.16
Seixos	37	0.22	6.81	2.35	0.70	1.71
Areia fina argilosa	48	0.26	5.78	2.41	0.78	1.93
Areia fina argilosa (sat)	100	0.26	5.14	2.24	1.00	2.24
Areia argilosa (sat)	100	0.27	2.30	1.27	1.00	1.27
Silte argiloso compactado	45	0.21	3.77	1.66	0.76	1.31

Onde  $k_{yeco}$  é condutividade do solo seco,  $k_s$  condutividade dos sólidos,  $k_{sat}$  condutividade do solo saturado,  $K_e$  o número de Kersten,  $kw=0.6$  W/mK e  $k$  a condutividade térmica média do solo.

Tabela 4.7 - Condutividades térmica segundo Côté and Konrad (2005)

Tipo de solo	Saturação (%)	$K_{seco}$ [W/m.K]	$k_s$ [W/m.K]	$k_{sat}$ [W/m.K]	$K_e$ [W/m.K]	$k$ [W/m.K]
Sedimentos	23	0.19	6.02	2.21	0.51	1.23
Seixos	37	0.22	6.81	2.46	0.68	1.74
Areia fina argilosa	48	0.26	5.78	2.44	0.77	1.94
Areia fina argilosa (sat)	100	0.26	5.14	2.14	1.00	2.14
Areia argilosa (sat)	100	0.22	2.31	1.26	1.00	1.26
Silte argiloso compactado	45	0.22	3.78	1.66	0.61	1.10

Onde  $k_{seco}$  é condutividade do solo seco,  $k_s$  condutividade dos sólidos,  $k_{sat}$  condutividade do solo saturado,  $K_e$  o número de Kersten,  $kw=0.6$  W/mK e  $k$  a condutividade térmica média do solo.

Tabela 4.8 - Condutividade térmica segundo Lu et al. (2007)

Tipo de solo	Saturação (%)	$k_{seco}$ [W/m.K]	$k_s$ [W/m.K]	$k_{sat}$ [W/m.K]	$K_e$ [W/m.K]	$k$ [W/m.K]
Sedimentos	23	0.24	6.02	1.95	0.58	1.24
Seixos	37	0.26	6.81	2.35	0.72	1.76
Areia fina argilosa	48	0.29	5.78	2.41	0.79	1.96
Areia fina argilosa (sat)	100	0.29	5.14	2.24	0.79	1.83
Areia argilosa (sat)	100	0.27	2.31	1.27	0.81	1.08
Silte argiloso compactado	45	0.26	3.78	1.66	0.69	1.22

Onde  $k_{seco}$  é condutividade do solo seco,  $k_s$  condutividade dos sólidos,  $k_{sat}$  condutividade do solo saturado,  $K_e$  o número de Kersten,  $kw=0.6$  W/mK e  $k$  a condutividade térmica média do solo.

Com os resultados mostrados nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 se obtém a Tabela 4.9, que dá finalmente os resultados das condutividades térmicas determinadas para cada camada de solo segundo os autores mencionados anteriormente.

Tabela 4.9 - Tabela resumo da condutividade térmica do solo determinada pelas diferentes correlações empíricas e semi-empíricas.

Tipo de solo	Saturação (%)	Kersten (1949)	Johansen (1975)	Côté & Konrad (2005)	Lu et al. (2007)
Sedimentos	23	1.31	1.16	1.23	1.24
Seixos	37	1.66	1.71	1.74	1.76
Areia fina argilosa	48	2.01	1.93	1.94	1.96
Areia fina argilosa (sat)	100	2.13	2.24	2.14	1.83
Areia argilosa (sat)	100	2.32	1.27	1.26	1.08
Silte argiloso compactado	45	1.43	1.31	1.10	1.22

Devido aos conceitos descritos em cada modelo, existem métodos de cálculo que se aproximam aos resultados reais que se esperam obter. Segundo os resultados de cada modelo, e comparações estatísticas realizadas em trabalhos de autores como Barry-Macaulay et al. (2013), mostraram que o modelo de Côté & Konrad (2005) tem um erro médio entre resultados experimentais e semi-empíricos relativamente pequeno que dá proximidade entre os resultados para solos friccionais, porém, o modelo de Lu et al. (2007) comporta-se de melhor forma para solos finos obtendo-se menores valores RMSE (Barry-Macaulay et al, 2013). Por esta razão escolhidos os valores de condutividade térmica de Côté & Konrad (2005) para solos friccionais e Lu et al. (2007) para solos finos, além de serem resultados mais realistas devido ao erro relativo mostrado pelos autores.

Finalmente é determinada a capacidade de calor específica por meio da correlação de Johansen (1975). Também, são mostrados na Tabela 4.10 os valores finais para cada propriedade térmica (baseando-se no argumento do parágrafo anterior) e os respectivos teores de umidade e densidades dos diferentes solos, que são inputs do software COMSOL nos casos de calibragem, validação e estudo paramétrico do problema.

Tabela 4.10 - Valores finais das características do solo

Tipo de solo	Saturação (%)	$w$ (%)	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$k$ [W/(m.K)]	$C_p$ [J/(kg.K)]
Sedimentos	23	15.75	1573	1388	1.23	1208
Seixos	37	19.10	1810	1520	1.74	1267
Areia fina argilosa	48	18.30	1960	1660	1.94	1250
Areia fina argilosa (sat)	100	23.33	2043	1660	2.14	1369
Areia argilosa (sat)	100	23.50	1984	1720	1.26	1468
Silte argiloso compactado	45	23.26	1940	1574	1.22	1365

Onde  $w$  é o teor de umidade gravimétrica,  $\rho$  densidade aparente e  $\rho_d$  densidade seca do solo.

## 5. ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTACA TROCADORA DE CALOR

Com o fim de determinar as condições ótimas de trabalho das estacas de energia em um solo tropical, como o de São Carlos, SP, se realizou uma análise de sensibilidade do modelo onde os elementos e parâmetros que fazem parte do domínio de solo são estudados. Também se realiza um estudo de numérico do ensaio TRT-1 para validar o resultado e fazer a análise paramétrica das possíveis variáveis geométricas, hidráulicas, térmicas e de configuração da estaca trocadora de calor. Durante a análise se obtêm os valores de taxa de troca de calor total ( $Q$ ) e normalizada pelo comprimento ( $Q_L$ ) para avaliar a efetividade térmica total e por comprimento de estaca durante o trabalho de 48 horas. Adicionalmente, se realizou a comparação dos resultados obtidos da avaliação, dando como resultado final um estudo paramétrico do sistema de estaca originalmente testado em campo.

### 5.1. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Antes de iniciar a simulação paramétrica é implementado um estudo de sensibilidade dos elementos finitos e do domínio de solo que são parte do modelo numérico. Realiza-se o estudo para obter as dimensões de erros comparando-se os resultados de modelos configurados com características geométricas da malha e dos elementos finitos.

Devido à utilização da metodologia dos elementos finitos, se precisam medir a sensibilidade dos resultados devido à mudança de parâmetros que caracterizam os modelos finitos do maior domínio (solo). Para isto, se realiza um modelo hipotético simples com o objetivo de se obter resultados de sensibilidade para determinar a configuração adequada em termos de tempo, exatidão, geometria e dimensão. Além disso, busca-se obter a melhor configuração do modelo em termos de tipo de elemento e densidade da malha.

Nesta parte da análise, portanto, se realizam casos hipotéticos variando-se condições sobre o modelo base para a solução. Para cada caso, se comparam os resultados em termos de número de elementos utilizados, tempo de processamento e valor do resultado para determinar a configuração ótima da condição avaliada. Depois de se realizar cada caso, se obteve um modelo referência com as condições ótimas consideradas, e com ele se representou um esquema padrão para obter resultados aproximados.

Para realizar este processo descrito são realizados 4 casos de análise. No primeiro caso se estuda a parte geométrica do domínio do solo. Na segunda parte, se estudam as dimensões

do modelo, ou seja, o tamanho mínimo que este deve ter para evitar interferência nas condições de borda devido aos efeitos de proximidade. O terceiro caso é a análise do tipo de elemento finito. Por último, se analisa a densidade da malha no domínio.

Considera-se o modelo baseado no caso experimental estudado nesta Dissertação. Logo se ilustra na Figura 5.1 o modelo do ensaio TRT formado por um domínio de solo com 6 camadas (separando o solo saturado com o solo não saturado), uma estaca de 25 cm de diâmetro e 12 m de comprimento com uma tubulação tipo U incorporado na estaca.



Figura 5.1. Modelo base para calibração no software COMSOL Multiphysics.

Como condições iniciais e de contorno, foi simulada a variação de temperatura superficial variável com o tempo, a temperatura inicial do solo (24°C), a temperatura constante do solo na parte inferior do domínio (24 °C) e a duração do ensaio 48 horas.

Para simplicidade deste estudo, se assumem valores próximos aos planejados para a realização do ensaio experimental com vazão média de 0.000157 m<sup>3</sup>/s (Re=8000) e temperatura de entrada na estaca de 50 °C constante ao longo do tempo. As propriedades dos materiais, parâmetros de entrada do software, são mostradas na Tabela 5.1. As propriedades são as utilizadas para a simulação de todos os modelos envolvidos na presente Dissertação já que foram calculados e determinados para este caso particular.

Os elementos finitos usados para a presente análise são do tipo 1D e 3D. Os domínios tridimensionais como o solo e a estaca estão compostos por elementos 3D, enquanto que os domínios lineares como as tubulações tem elementos 1D.

Tabela 5.1 - Propriedades térmicas dos materiais

Material	Capacidade Térmica $C_p$ J/(kg·K)	Condutividade térmica k W/(m·K)	Densidade $\rho$ kg/m <sup>3</sup>
Concreto	1000	2.00	2400
Sedimentos	1208	1.23	1573
Seixos	1267	1.74	1810
Areia siltosa fina	1250	1.94	1960
Areia siltosa fina (sat)	1369	2.14	2043
Areia siltosa (sat)	1468	1.26	1984
HDPE	-	0.48	-

### 5.1.1. Avaliação da geometria do domínio

Em seguida se comparam as respostas do domínio cilíndrico e paralelepípedo num modelo transiente de 48 h com a análise a cada hora de ensaio. Para este caso, se adotam domínios de forma paralelepípedo com lado b e cilindro de diâmetro d, onde  $b=d=5$  m.

As análises comparam o tempo de resposta, o número de elementos e de nós, e a temperatura de saída na tubulação. Determina-se a diferença entre respostas de temperatura e tempo de processamento. O critério que estima a configuração a utilizar é o que implemente menor tempo de processamento durante a modelagem.

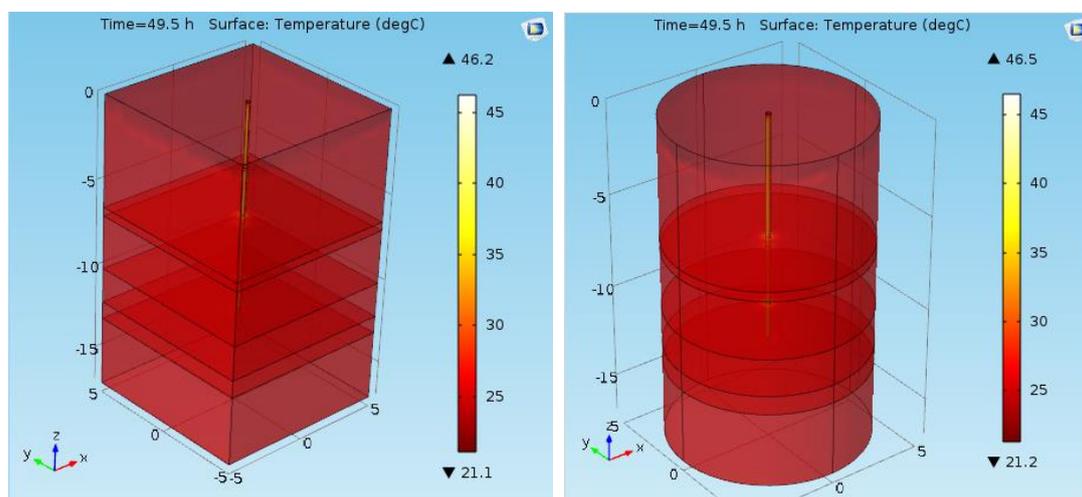


Figura 5.2 - Modelos com domínio de forma paralelepípedo (esquerda) e cilíndrico (direita).

Encontra-se uma diferença de tempo de 15 segundos no processo entre as duas soluções. Na Tabela 5.2, apresentam-se os resultados das modelagens. O domínio cilíndrico precisa de menor tempo para obter a solução, enquanto o domínio paralelepípedo aumenta em um 7% esta demanda. Como conclusão da análise da geometria do domínio, pode-se inferir

que para casos mais complexos esta diferença de tempo pode aumentar o que conclui que deve ser conveniente modelar com um domínio cilíndrico.

Tabela 5.2 - Resultados das modelagens - Geometria do domínio

Tipo de domínio	Núm. Elementos	Tempo Processo [s]	T média saída [°C]	%Δtempo [s]
Paralelepípedo	337.493	2341	47.72	7.0
Cilíndrico	335.467	2188	47.72	0

### 5.1.2. Avaliação do limite do domínio

Existem diferentes critérios da dimensão do domínio. Tem-se considerado em diferentes literaturas não perturbar a resposta térmica, por isto, durante as modelagens utilizam-se relações entre as dimensões do domínio. É utilizado comumente relações diâmetro/profundidade entre 0.3 a 0.5 para o domínio de solo. Para profundidade do domínio, geralmente implementa-se um valor de comprimento da estaca mais 30% ( $L_e + 0.30L_e$ ) ou simplesmente 10 m, como por exemplo foi percebido nos trabalhos de Laloui et al. (2006), Suryatriyastuti et al. (2012), entre outros.

Para este caso, se analisam os diferentes limites do domínio com o objetivo de definir-se uma relação entre o diâmetro do domínio *versus* a profundidade da estaca. São realizados em um domínio de solo com geometria cilíndrica variações nos limites laterais (raio) e profundidade.

Geralmente nos modelos finitos se simula o modelo representativo baseado num domínio semi-infinito do caso. Por este motivo, realizar modelos com maior espaço entre o objeto de análise e o limite do domínio gera como resultado uma solução cada vez mais exata em termos numéricos. A seguir foram analisadas as dimensões do domínio com relações  $R_{dom}/L_e$  da estaca igual a 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 e 1.6

O verdadeiro comportamento térmico da estaca de energia e do solo é bem simulado com a ótima aproximação dos limites com o domínio. Depois de certa distância entre a estaca e o limite do domínio, pode-se considerar que os resultados variam relativamente pouco. Nas Figuras 4.15 e 4.16 se podem observar que no início todos os resultados de temperatura mostram um aumento na temperatura do fluido que sai do sistema. Porém, esta temperatura de pico varia dependendo das condições iniciais do solo, da estaca e das condições de contorno como a temperatura na superfície.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 se mostram os resultados das diferentes análises. É notável perceber a variação nos resultados de temperatura de média do fluido que sai da estaca. Embora exista uma pequena variação nos resultados, estas diferenças implicam em grandes mudanças no trabalho térmico da estaca por unidade de comprimento, que neste caso tendem a ser menor a 2% de variação. As diferenças entre as temperaturas médias de saída implicam ter pequenas variações na variável de interesse (taxa de calor trocado -  $Q_L$ ), o que conclui que ter limites maiores não perturba em grande medida os resultados de calor trocado entre os modelos comparados. Finalmente e de acordo aos resultados mostrados, para todos os modelos, se realiza um domínio de solo com dimensões de raio igual ao raio da estaca + 3.0 m e altura igual ao comprimento da estaca +5 m.

Tabela 5.3 - Resultados térmicos considerando os limites laterais do domínio com relação ao comprimento da estaca

Raio do domínio [m]	Altura do domínio [m]	T entrada [°C]	T média saída [°C]	$\Delta Q_T$ [W/m]	$\Delta T$ saída (%)
0.2L	17 m	50	47.70	125.85	0.04
0.4L	17 m	50	47.70	125.85	0.04
0.8L	17 m	50	47.69	126.45	0.01
1.2L	17 m	50	47.68	126.60	0.01
1.6L	17 m	50	47.68	126.94	0.00

Tabela 5.4 - Resultados térmicos considerando os limites em altura do domínio com relação ao comprimento da estaca

Raio do domínio [m]	Altura do domínio [m]	T entrada [°C]	T média saída [°C]	$\Delta Q_L$ [W/m]	$\Delta T$ saída (%)
3.0	0.2L+L	50	47.66	128.29	0.07
3.0	0.4L+L	50	47.67	127.05	0.02
3.0	0.8L+L	50	47.69	127.66	0.00
3.0	1.2L+L	50	47.69	126.51	-0.01
3.0	1.6L+L	50	47.69	126.43	0.00

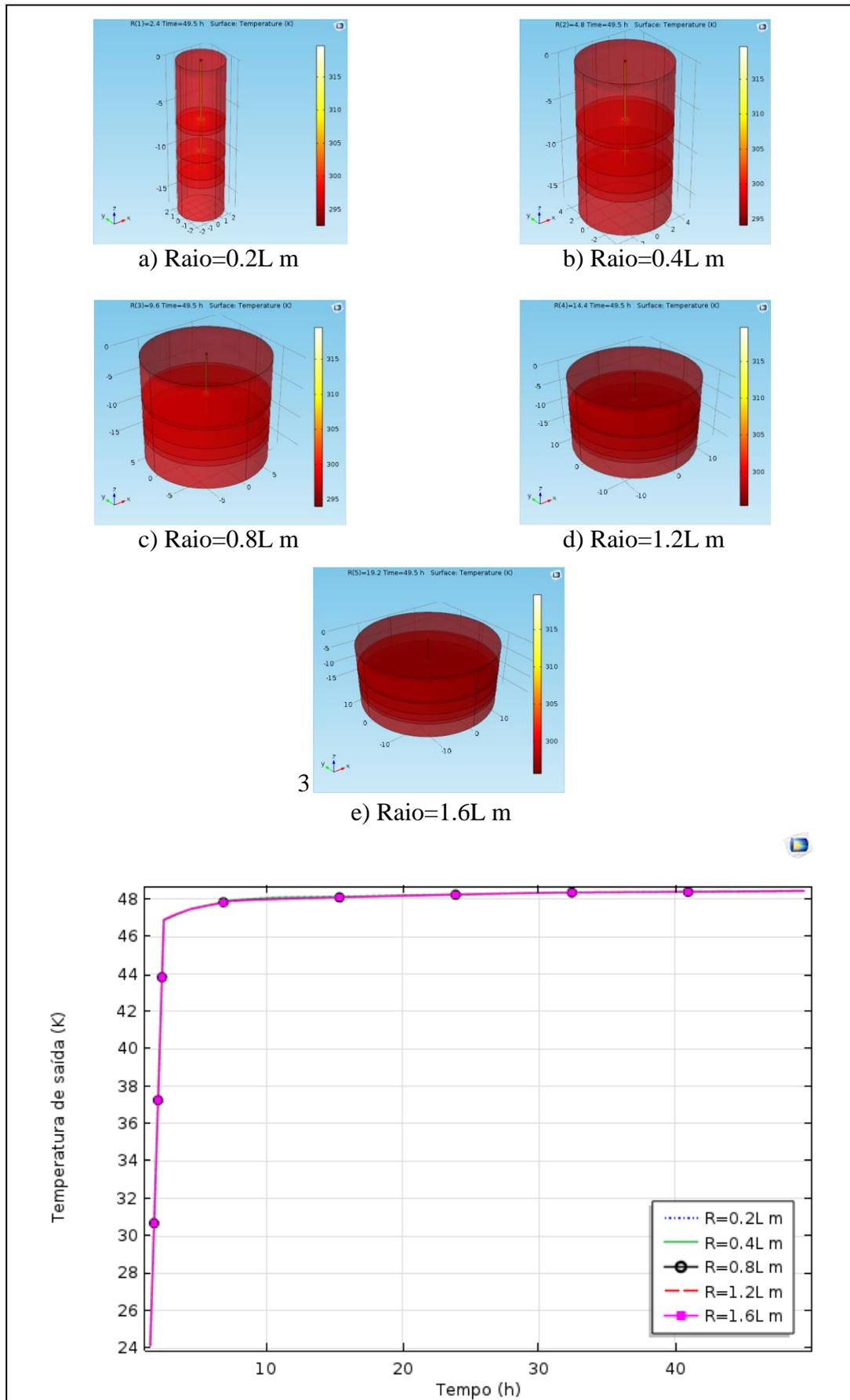


Figura 5.3 - Temperatura dos domínios de solo com diferentes diâmetros após 48 h.

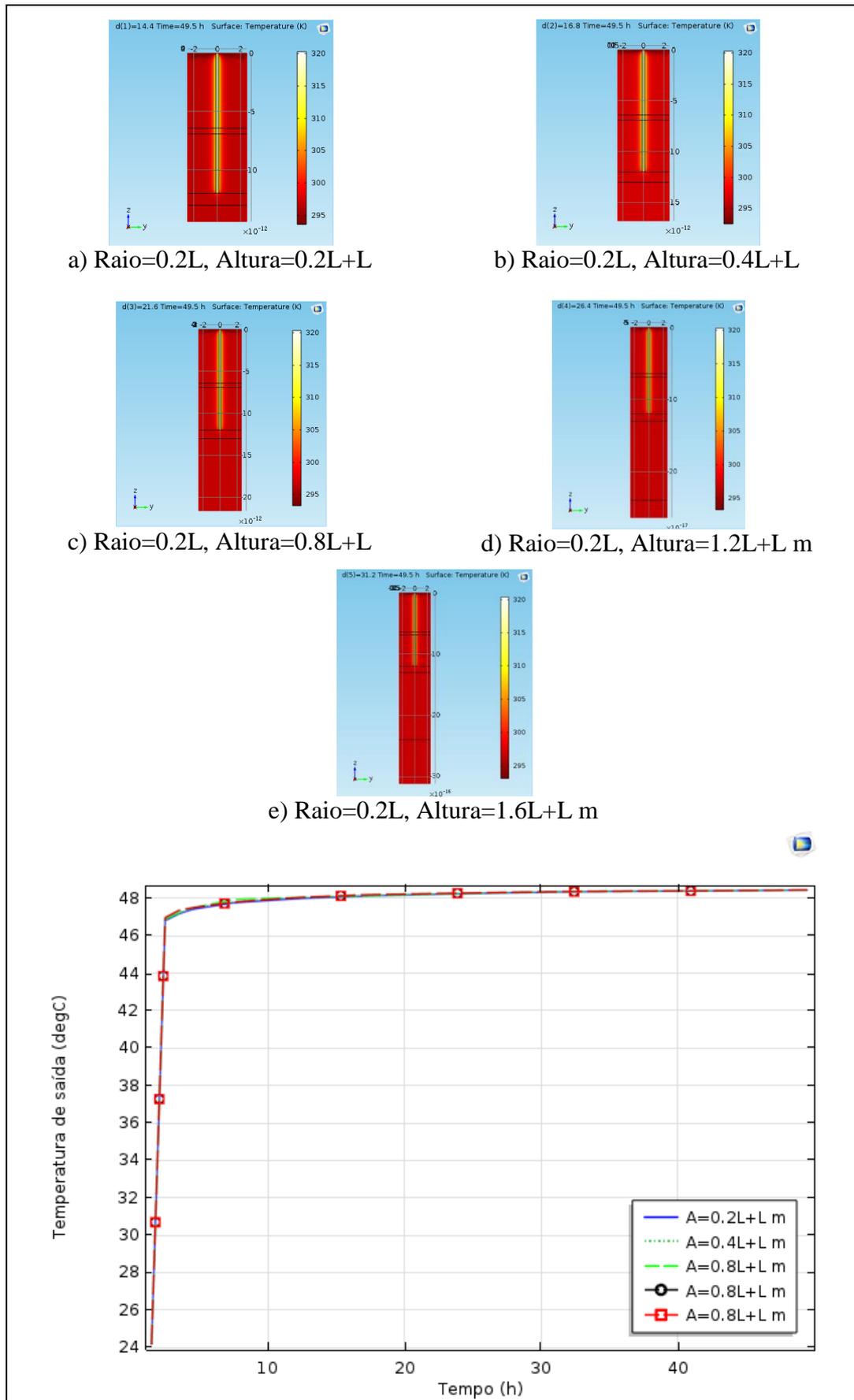


Figura 5.4 - Temperatura dos domínios de solo com diferentes alturas após 48 h.

### 5.1.3. Avaliação do tipo de elemento

O software COMSOL permite utilizar 3 tipos de elementos finitos. Se podem usar elementos tipo tetraedro (C3D4), prismáticos (C3D6) e hexaedros (C3D8) para análises 3D e elementos tipo EDGE em modelos 1D, 2D e 3D. Para este caso particular, a estaca está formada por elementos C3D4, e a tubulação de elementos tipo EDGE. Esta configuração se realiza devido à densidade de nós apresentados na região que gera poucos espaços entre os mesmos dentro da estaca. São testados os diferentes tipos de elementos para o domínio de solo e avaliados os efeitos numéricos que se geram com cada modelo.

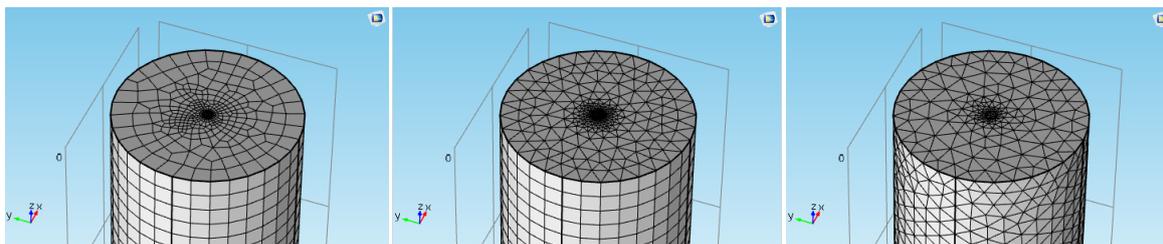


Figura 5.5 - Diferentes elementos no domínio: Hexaédrico, Prismático e Tetraédrico.

Além de se analisar a resposta térmica dos modelos também é avaliada a taxa de troca de calor para os diferentes casos. Obtém-se um comportamento da troca de calor diferente para cada caso, o que significa que para modelos com pouco tempo de simulação, o comportamento da troca de calor seria distinto e os resultados variariam dependendo do tipo de elemento finito. Na Figura 5.6 se pode observar que para os 3 resultados existe uma tendência no comportamento da temperatura de saída depois de aproximadamente 48 horas de trabalho. A resposta do modelo com elementos prismáticos no domínio de solo é muito similar ao formado por elementos hexaédricos. A eficiência entre elementos processados e o tempo de processamento com elementos tetraédricos é muito interessante devido ao maior número de elementos por unidade de tempo.

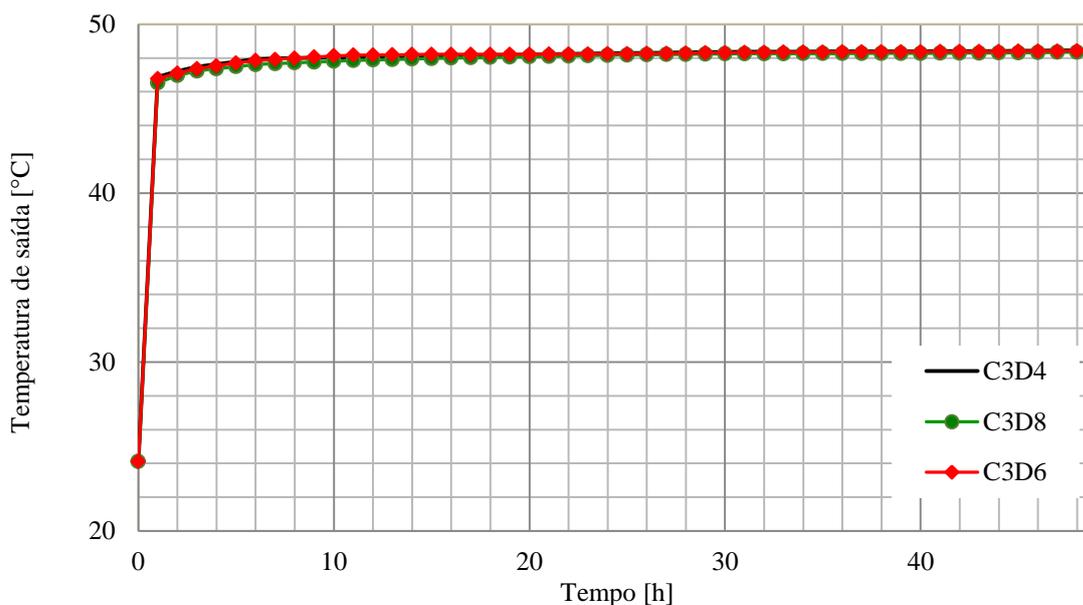


Figura 5.6 - Comportamento da temperatura de saída com diferentes elementos finitos.

Na Tabela 5.5 são mostrados os resultados de eficiência e fluxo de calor entre o meio composto e o fluxo da estaca. De acordo com os resultados, nota-se que a diferença nos resultados térmicos é quase nula, sendo os resultados muito similares entre si. Em termos de tempo o domínio formado por elementos 3D hexaédricos demanda menor tempo no processo com um resultado perto dos outros resultados. No modelo simulado com elementos hexaédricos se faz necessário realizar um refinamento da malha para obter resultados similares aos obtidos em um domínio composto por elementos tipo tetraédrico ou prismático. O elemento prismático dá um menor tempo de processamento com resultados aceitáveis.

Tabela 5.5 - Resultados dos modelos com relação aos limites do domínio de solo

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Tempo Processamento [s]	T entrada [°C]	T média saída [°C]	Eficiência [elem/s]
C3D4	365416	2846	50.0	48.17	128.40
C3D6	95061	1502	50.0	48.16	63.29
C3D8	31546	753	50.0	48.02	41.89

Além do estudado para este caso, o software COMSOL sugere utilizar elementos tetraédricos para as diferentes análises em modelos 3D. Com os resultados ilustrados anteriormente, mostra-se que existe relativamente uma menor taxa de troca de calor entre o solo e o sistema de estaca de energia que é analisado. Embora este tipo de elemento

possibilite uma pequena distorção no resultado, a eficiência de processamento é a melhor comparando com os outros tipos de elementos.

#### **5.1.4. Avaliação da densidade da malha**

Finalmente ao concluir a etapa de estudo e análise do domínio de solo, e tipos de elementos finitos, é importante avaliar as dimensões dos elementos para consolidar a densidade da malha. As dimensões dos elementos finitos influem nos resultados finais da análise do modelo. Uma malha grossa teria um menor número de elementos e consequentemente menos número de nós no domínio do que se a mesma malha fosse mais fina (ou densa). O número de elementos e mesmo de nós, é bem importante na determinação de uma solução próxima ao resultado certo. Isto gera um maior número de interpolações entre nós que demanda maior tempo. Devido a isto se deve procurar um domínio com dimensões de elementos ótimos em termos de tempo e resultado.

Estudam-se as malhas variáveis existentes no programa COMSOL para realizar este tipo de análise. O nível de densidade aumenta na medida em que a análise é perto da estaca. O software conta com malhas extremamente grossas, muito grossas, grossas, normais, finas, muito finas e extremamente finas. O tipo de malha nos domínios 3D se relaciona com os elementos 1D para cumprir com as necessidades de precisão e tempo de simulação. Neste caso é variada a malha do domínio do solo de acordo com critérios geométricos provados por alguns autores. Para a malha dos elementos que conformam a tubulação e estaca, se padronizou uma malha densa que assegura exatidão na hora de obter resultados na região de estudo.

São simulados para o mesmo exemplo as diferentes malhas mostradas na Figura 5.7 que mostram as malhas densas, normal e fina na parte superior, e muito fina, extrafina e extremadamente fina na parte inferior, respectivamente.

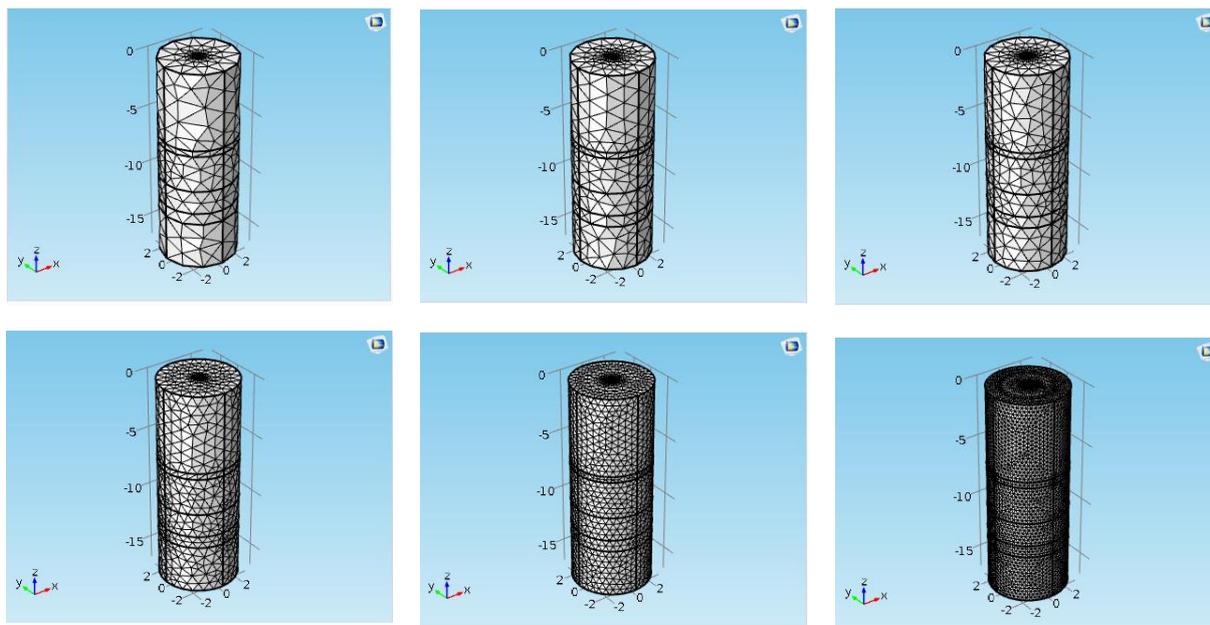


Figura 5.7 - Densidades de malha no domínio de solo em um modelo de estaca de energia

Adicionalmente se levam em conta critérios gerais adotados por autores que estudaram o caso de dimensão dos elementos finitos. Recomenda-se realizar modelos com malhas de acordo aos seguintes critérios e simplificações

- Realizar o maior número de simplificações geométricas do modelo para reduzir o tamanho e o tempo de análise.
- A geração da malha deverá ser progressiva, aumentando a densidade nas zonas de maior interesse.
- Deve-se considerar uma relação entre os lados dos elementos perto de 1:1 e não superior a 1:4. Os elementos de maior tamanho são geralmente colocados nas áreas menos solicitadas, perto das bordas do modelo.
- Os elementos não deverão ser distorcidos. Os ângulos entre os lados dos elementos adjacentes não devem exceder  $90^\circ$ , e não superar os  $180^\circ$ .

Ao processar cada modelo com diferentes malhas no domínio de solo, nota-se que existem diferentes resultados. Na Tabela 5.6 são mostrados os resultados de cada tipo de malha avaliada no software COMSOL Multiphysics. As malhas variáveis realizam-se de maneira automática indicando só as dimensões e as proporcionalidades entre lados. Estas configurações são as recomendadas pelo software (configuração padronizada) para realização de malhas 3D.

Tabela 5.6 - Resultados da densidade da malha no domínio de solo

Tipo de malha	Tamanho Máximo [m]	Tamanho mínimo [m]	Relação arestas	Núm. de elementos	Tempo [s]	T média saída [°C]
Grossa	5.25	0.98	1.60	267937	2064	48.19
Normal	3.50	0.63	1.50	304036	2105	48.19
Fino	2.80	0.35	1.45	329726	2276	48.19
Muito fino	1.93	0.14	1.40	365416	2527	48.17
Extrafino	1.23	0.05	1.30	383,674	3166	48.17
Extremamente fino	1.00	0.01	1.35	511741	4565	48.18

Na Figura 5.8 são ilustrados os resultados da temperatura de saída na estaca de energia modelada com diferentes densidades de malhas variáveis. Nota-se que entre a malha grossa e a extremamente fina existe uma diferença que no final se traduz obtendo quase a mesma temperatura média de saída.

Finalmente, depois de se conhecer os resultados da variação nas dimensões dos elementos finitos, pode-se concluir que o tipo de malha ótimo para as modelagens seria uma malha variável que tenha elementos em dimensões normais. Será reduzido o tamanho da malha em camadas com espessuras baixas como a camada de seixos (segunda camada). Coloca-se uma malha tipo extremamente fina para ter maiores elementos nessa região.

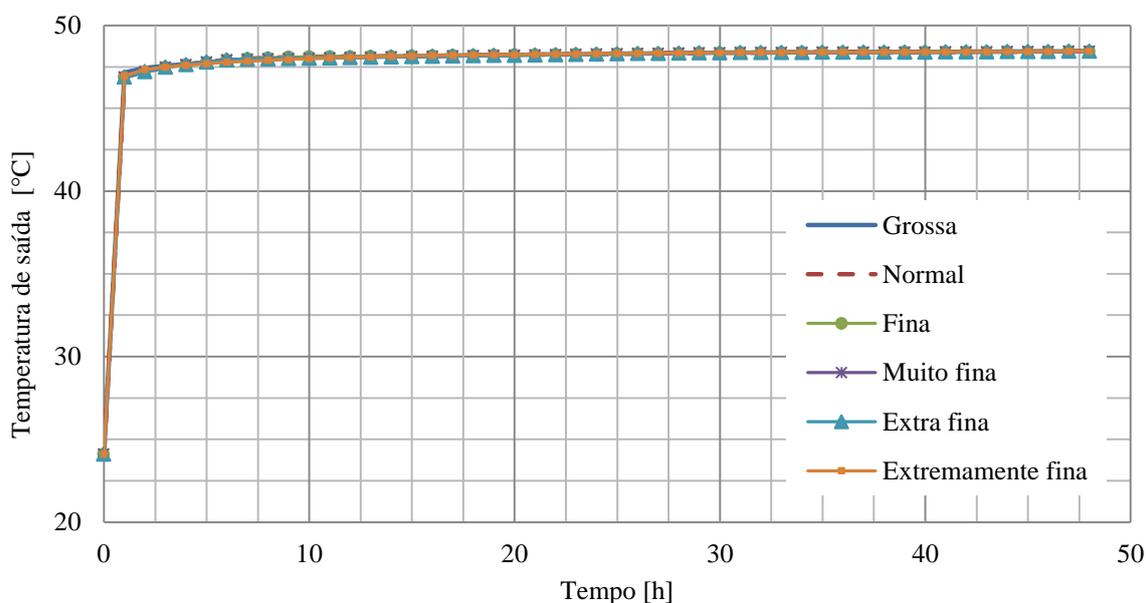


Figura 5.8 - Resposta térmica para cada domínio de solo avaliado com diferentes densidades de malha.

### **5.1.5. Resumo do estudo da sensibilidade dos elementos finitos**

O estudo de sensibilidade dos componentes que formam parte do domínio de solo permite realizar um modelo padrão que leva em consideração as configurações ótimas determinadas como ótimas para o problema. Mostrou-se que a variação nos resultados de temperatura de média do fluido que sai da estaca durante a variação de geometria e limites do domínio. Isto recomenda em termos de tempo uma geometria cilíndrica com um raio de 3.0 m e altura de  $L_e+5$  m. Em termos do tipo de elemento, a variação entre cada elemento é notável, embora escolher elementos tetraédricos recomendados pela COMSOL devido à eficiência na hora do processamento se analisa maior numero de elementos por tempo. Finalmente com relação à densidade da malha, os resultados também são notáveis em pequena variação o que permite concluir utilizar uma malha de densidade "normal" que também se ajusta à variação de dimensões dos modelos finitos do modelo.

### **5.2. CALIBRAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO TRT**

Conhecendo a configuração ótima para realizar a simulação do modelo TRT e com as condições de contorno e valores iniciais do modelo experimental conhecidas simulou-se por meio do software COMSOL Multiphysics o ensaio realizado em campo, isto com o objetivo de calibrar os parâmetros térmicos calculados, como as propriedades dos materiais que conformam o solo. Na Figura 5.9 se ilustra o estado inicial do modelo de estudo antes da simulação do ensaio TRT (este modelo identificado como modelo padrão ou TRT0), onde tanto condições iniciais e de contorno como os modelos finitos já configurados, são conformados para realizar as análises térmicas em questão.

Nesta parte da Dissertação se comparam os resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais para se validar os resultados numéricos. De igual forma, contando com a informação certa das condições de contorno, os resultados desta validação podem calibrar os parâmetros térmicos calculados e assinados para cada camada de solo que pertencem ao domínio do problema.

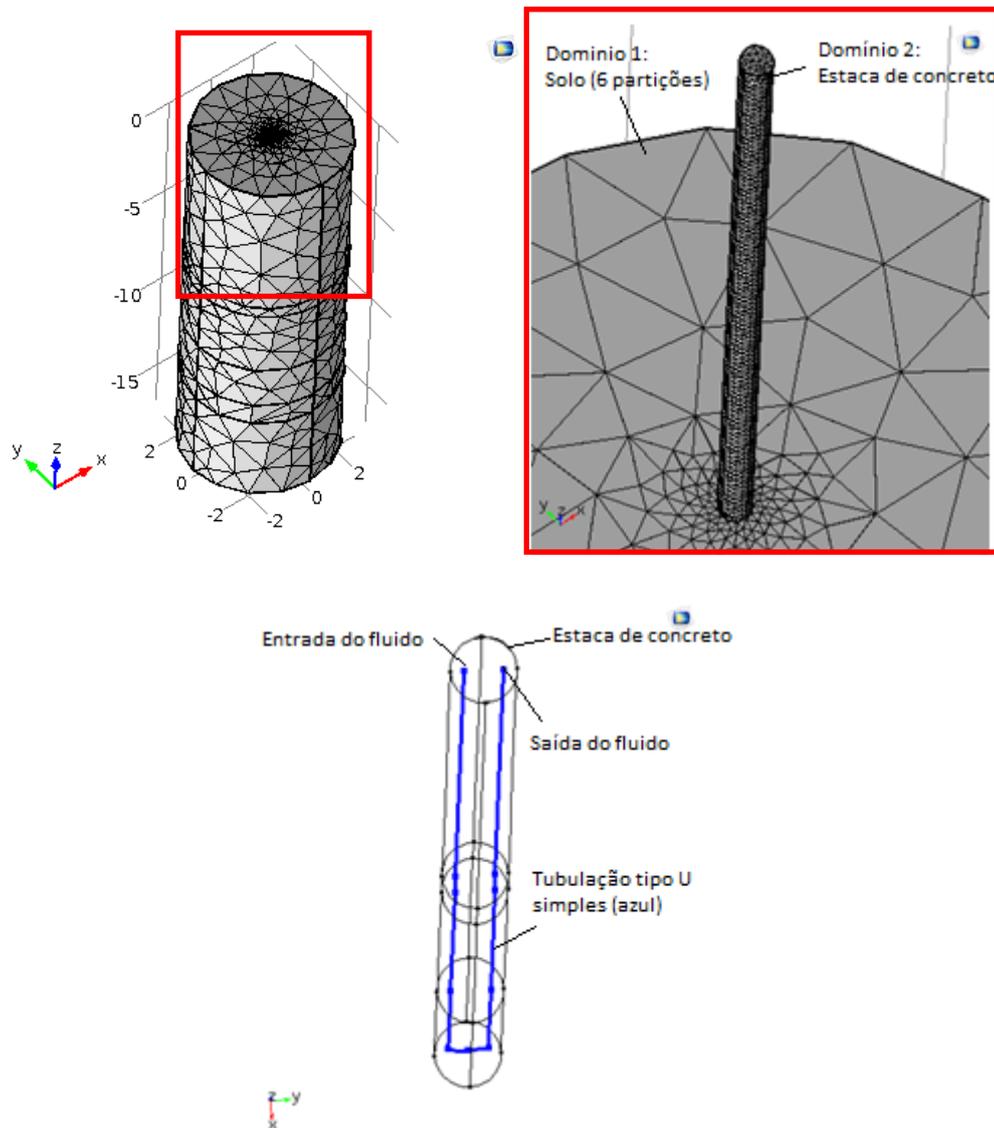


Figura 5.9 - Estado final do modelo após estudo de sensibilidade dos modelos finitos e condições iniciais e de contorno (unidades em metro).

Finalmente, tal como foi apresentado no Item 2.6 e utilizado durante a análise de sensibilidade dos modelos finitos, a avaliação da eficiência térmica da estaca de energia se determina para o modelo de ensaios TRT determinando a partir das Eqs. (41) e (42) a taxa de calor trocado total ( $Q$ ) como também a taxa normalizada pelo comprimento da estaca ( $Q_L$ ).

$$Q = c_w \rho_w q_{\text{entrada}} (T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}) \quad (41)$$

$$Q_L = c_w \rho_w q_{\text{entrada}} \left( \frac{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}}{L_e} \right) \quad (42)$$

### 5.2.1. Procedimento das modelagens em COMSOL Multiphysics.

Na etapa de modelagem e simulação dos ensaios TRT em COMSOL Multiphysics é realizado um procedimento que permite obter os resultados de cada modelo. Para esta simulação se adquiriu os módulos *Heat transfer* e *Pipe Flow* do software COMSOL em que se adotam condições de estudo que se levam nestas simulações.

O procedimento da modelagem e simulação numérica dos ensaios TRT consiste nos seguintes passos:

- 1) São inseridos os parâmetros e variáveis de entrada (p.e, comprimentos, temperaturas constantes, relações entre base e diâmetro do domínio de solo, etc).
- 2) Inserem-se as funções de contorno como a variação da temperatura superficial com o tempo, função da temperatura inicial do solo, tubulações (com água) e estaca, e a função da variação da temperatura de entrada na estaca.
- 3) É montada a geometria global do modelo com os elementos 3D (solo, tubulação e estaca).
- 4) É montada a geometria da tubulação incorporada na estaca com linhas desenhadas em planos.
- 5) São realizadas partições no domínio de solo correspondente às camadas de solo, nível da água freática e profundidade da estaca.
- 6) São inseridos os materiais com as respectivas características ( $k$ ,  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $e$ ) e atribuídos à geometria 3D e 1D.
- 7) Configura-se o modelo *Pipe Flow* selecionado a geometria 1D (tubulações) como tubulação.
- 8) Atribuem-se as características térmicas e hidráulicas da tubulação e do fluido como informação nodal (p.e, modelo de fricção da tubulação, condições iniciais de pressão e temperatura, vazão e características geométricas e térmicas da tubulação). Configura-se a interação térmica entre a estaca e a tubulação.
- 9) Atribuem-se as características térmicas (condições de contorno) e condições iniciais dos domínios sólidos.
- 10) Realizam-se a configuração da malha e os elementos finitos.
- 11) Adotam-se e configuram-se um estudo transitório (dependente do tempo) definindo os tempos de início, tempos de análise e tempo final do estudo.
- 12) Finalmente, inicia-se a simulação numérica do TRT. Condições iniciais e de contorno

### 5.2.2. Condições iniciais e de contorno do modelo

Em métodos de solução de problemas estacionários e transientes é importante definir as condições gerais do modelo. Em ensaios TRTs são monitoradas as variáveis que interatuam durante o ensaio como são, por exemplo, a temperatura de entrada na tubulação, os tempos de seguimento, a temperatura ambiente e a vazão. Por esta razão se utilizou a informação adquirida experimentalmente para inserir condições iniciais e de contorno no modelo numérico.

Em seguida, são descritas e explicadas brevemente cada uma das condições iniciais e de contorno que conformam os modelos dos ensaios TRT:

#### a) Valores iniciais do modelo numérico:

- *Temperatura inicial ambiente:* Esta temperatura monitorada no início do ensaio foi de 26.5 °C aproximadamente (299.65 K).
- *Temperatura do solo:* A temperatura inicial do solo ao longo da profundidade se ilustra na Figura 5.10.

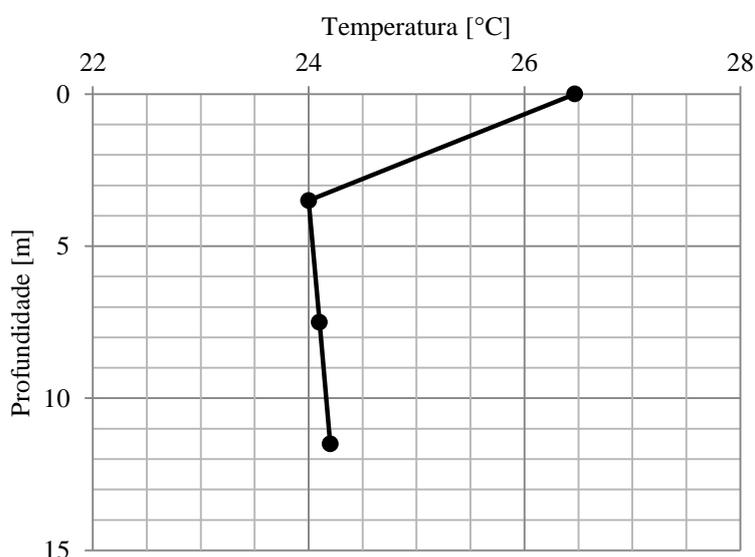


Figura 5.10 - Temperatura do solo no início do TRT (Neto, 2015)

- *Temperatura da estaca e tubulação (com água):* Como foi descrito no Capítulo 1 (hipóteses do problema), a temperatura inicial das tubulações e da estaca são iguais à temperatura do solo em primeira instância.
- *Velocidade da água na tubulação:* a água inicialmente está em um estado quase estático e se define como velocidade inicial do fluido como 0.01 m/s.

- *Pressão na saída da tubulação:* a pressão na saída da tubulação é simulada como uma saída de água à pressão atmosférica com valor 102,100 Pa.
- *Tempos de seguimento (Step time):* em fenômenos com análises transientes como este, é importante definir a cada quanto tempo se realiza a análise numérica, obtendo-se assim resultados parciais das variáveis de interesse. Neste caso, o tempo de seguimento para as etapas do modelo é de 15 min (900 s).
- *Tempo final:* O tempo final da análise corresponde ao tempo de duração do ensaio TRT. O tempo final do ensaio é de 48 horas (178200 s).

**b) Condições de contorno do modelo numérico:**

- *Temperatura superficial:* ver Item 3.10 Figura 3.9. No modelo, se simula a variação de temperatura por meio de uma camada de ar que atua como um buffer de 1 cm na superfície do solo para diminuir os erros durante a variação da temperatura na superfície dos domínios de solo e estaca.
- *Temperatura constante em profundidade:* esta condição na fronteira inferior do domínio de solo representa a temperatura constante do solo durante todo o ano, igual a 24°C (297 K).
- *Temperatura da água na entrada da estaca:* ver Item 3.10 Figura 3.10.
- *Isolamento do domínio de solo:* É isolado o domínio de solo nas fronteiras laterais. Esta condição não permite fluxo de entrada e saída do domínio, pois o fluxo de calor considerado é o fluxo vertical gerado pelas temperaturas de profundidade e superfície.
- *Vazão do fluxo circundante nas tubulações:* ver Item 3.10 Figura 3.11

**5.2.3. Simulação numérica da resposta térmica do sistema de estaca com condutividade térmica do solo calculada y experimental.**

Com os resultados numéricos conseguidos com o software COMSOL Multiphysics se determinou a evolução da temperatura do fluxo na saída da estaca trocadora de calor. Observa-se na Figura 5.11 a evolução da temperatura durante as 48 horas do ensaio para os modelos com condutividade térmica do solo calculado pelas formulações semi-empíricas (modelo multicamadas) e condutividade térmica igual para todas as camadas de solo com  $k=2.42$  W/m.K (modelo de camada equivalente) fornecido pelos resultados experimentais do ensaio TRT.

Pode-se mostrar que tanto para o modelo multicamada e o modelo de camada equivalente a temperatura do fluido na saída da estaca responde inicialmente com temperaturas perto da temperatura do solo ( $23.8^{\circ}\text{C}$ ), e na medida em que o ensaio avança, essa temperatura vai aumentando a um valor quase constante próximo aos  $41^{\circ}\text{C}$ . Este equilíbrio térmico se observa aproximadamente depois das 27 horas de ensaio (97200 s).

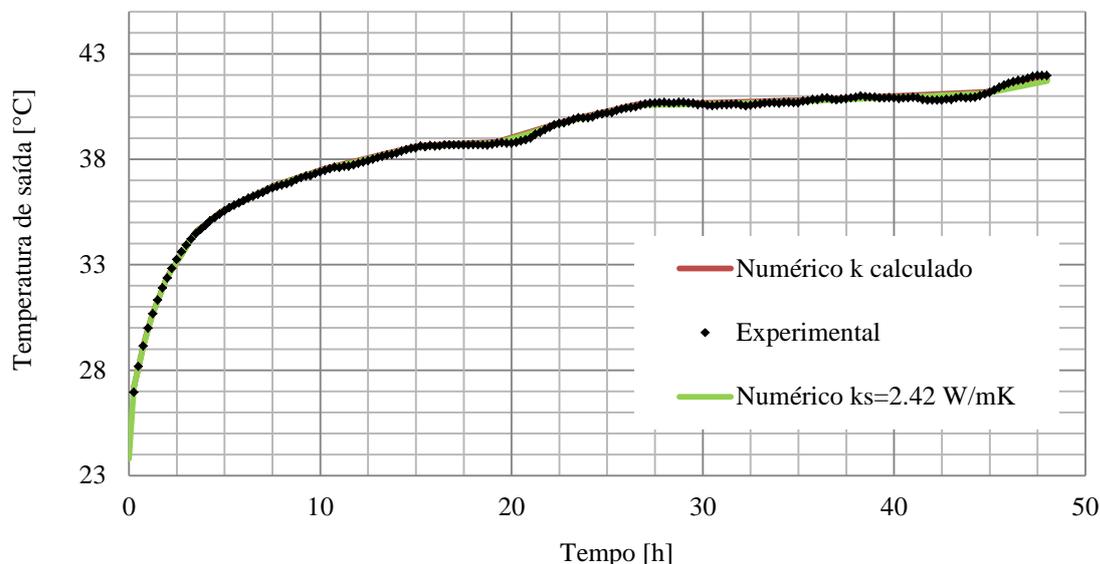


Figura 5.11 - Resposta térmica da estaca obtida numericamente no software COMSOL.

O resultado simulado é comparado com a temperatura do fluxo na entrada da estaca para se determinar a mudança de temperatura do fluido, e com este o fluxo de calor. De acordo com os resultados atingidos numericamente e mostrados na Tabela 5.7 a estaca forneceu aproximadamente 786 W no modelo numérico multicamada e 881 W no modelo numérico de camada equivalente em cada segundo do ensaio. Desta forma, se obtém o valor de 66 W e 73 W aproximadamente por cada metro de estaca respectivamente. De acordo com estes resultados de troca de calor o erro para cada modelo numérico com relação ao resultado experimental é de 15% para o modelo numérico multicamadas e de 5% para o modelo numérico de camada equivalente. Com isto, pode-se verificar que os modelos semiempíricos para o cálculo de propriedades térmicas não são precisos na hora de fornecer os valores de condutividade térmica para solos tropicais, pois o erro de 15% pode estar associado a fatores mineralógicos como a influencia de óxidos de ferro na taxa de troca de calor final que não se consideram nestas formulações.

Por outro lado, a Figura 5.12 mostra a evolução do fluxo de calor normalizado pelo comprimento da estaca. Ilustra-se um comportamento do fluxo de calor variável durante a

transferência de calor que oscila entre 24.8 W/m e 128.5 W/m aproximadamente no modelo multicamada. No modelo numérico de camada equivalente, os valores da taxa de troca de calor variam entre 46.5 W/m e 139.3 W/m.

Tabela 5.7 - Resumo dos resultados numéricos da troca de calor no ensaio TRT

RESUMO DOS RESULTADOS			
	Numérico $k_s$ calculado	Numérico $k_s=2.42$ W/(m.K)	Experimental
Diâmetro da estaca [m]	0.25	0.25	0.25
Comprimento da estaca [m]	12	12	12
Vazão média [l/min]	27.8	27.8	27.8
Tipo de tubulação	U	U	U
Fluxo total médio (Q) [W]	786.81	881.72	935.12
Flux médio normalizado ( $Q_L$ ) [W/m]	65.57	73.48	77.93

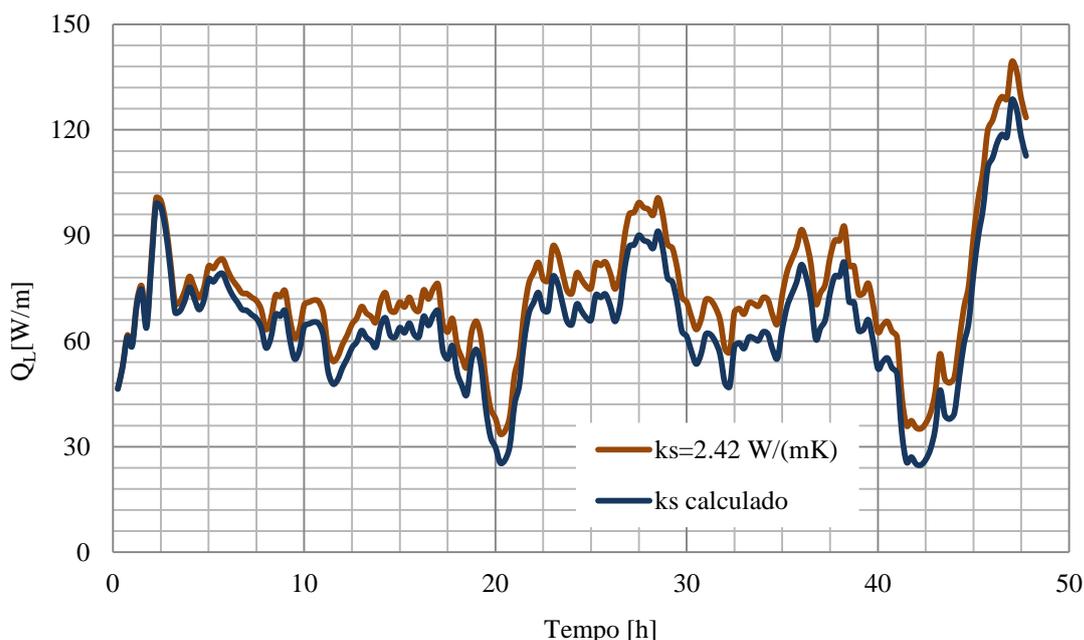


Figura 5.12 - Evolução da taxa de troca de calor normalizada durante 48 h de ensaio.

#### 5.2.4. Simulação da resposta térmica do solo após o ensaio TRT com condutividade térmica calculada (modelo numérico multicamada).

O modelo numérico térmico multicamada é tomado como modelo principal para realizar a análise da influência térmica do ensaio TRT no solo circundante. Os resultados de temperatura no solo circundante e a estaca trocadora de calor são fundamentais para determinar perfis térmicos, linhas isotérmicas e volumes térmicos de atuação térmica. Este

tipo de informação é substancial no momento de se avaliar condições de separação de estacas e espaçamento ótimo em um grupo de estacas.

Na Figura 5.13 se ilustra o resultado 3D de temperatura na estaca de concreto e no solo circundante após 24 horas de ensaio. Durante este tempo de ensaio TRT a estaca de concreto registra temperaturas entre 28°C e 38°C, enquanto o solo registra temperaturas entre 24°C e 28°C.

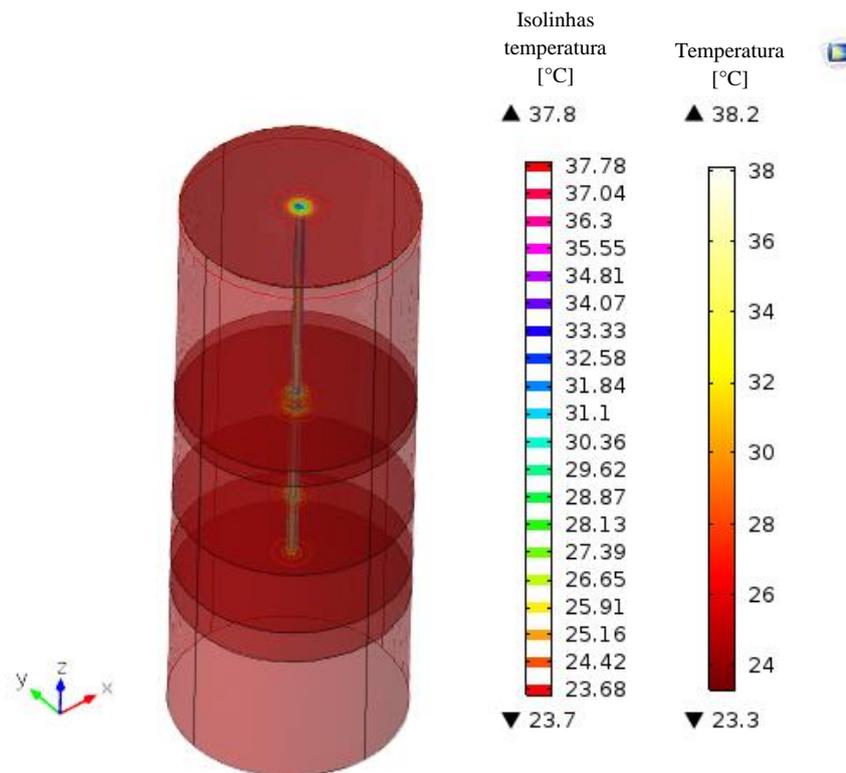


Figura 5.13 - Resultados de temperatura no espaço após as 24 h de ensaio

Na Figura 5.14 se ilustra o resultado 3D de temperatura na estaca de concreto e no solo circundante após 24 horas de ensaio. A informação indica que após realizar o ensaio TRT a estaca de concreto registra temperaturas entre 32°C e 40°C, enquanto o solo registra temperaturas entre 24°C e 32°C.

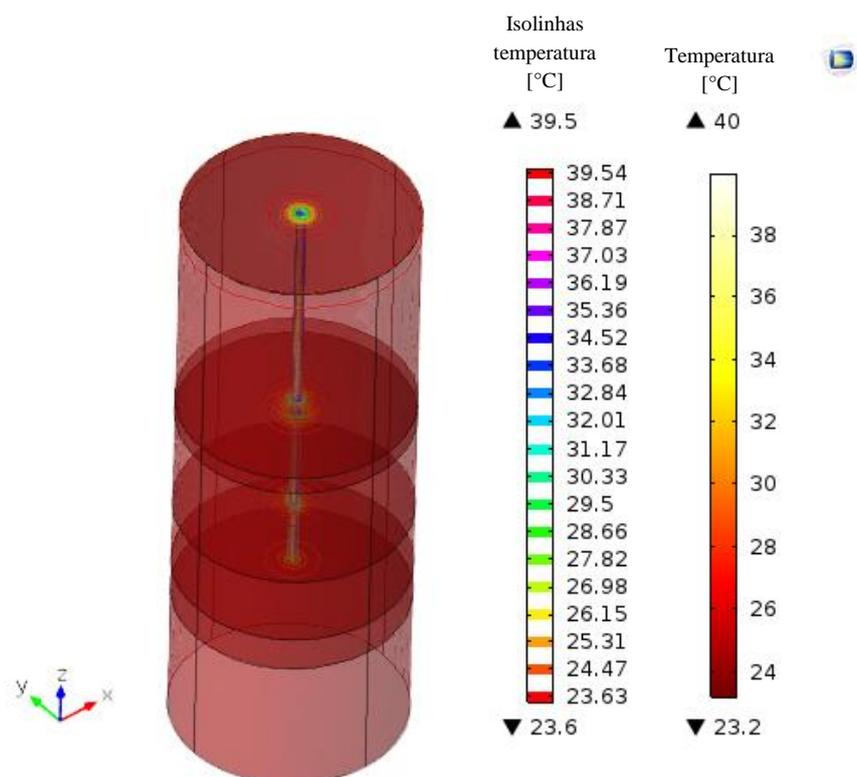


Figura 5.14 - Resultados de temperatura no espaço após as 48 h de ensaio.

Por outro lado, também se nota a direção do fluxo de calor. De acordo com os resultados finais de troca de calor, este flui da estaca para o solo, informação esta que se observa na Figura 5.15, onde as setas confirmam a direção e magnitude do fluxo em troca.

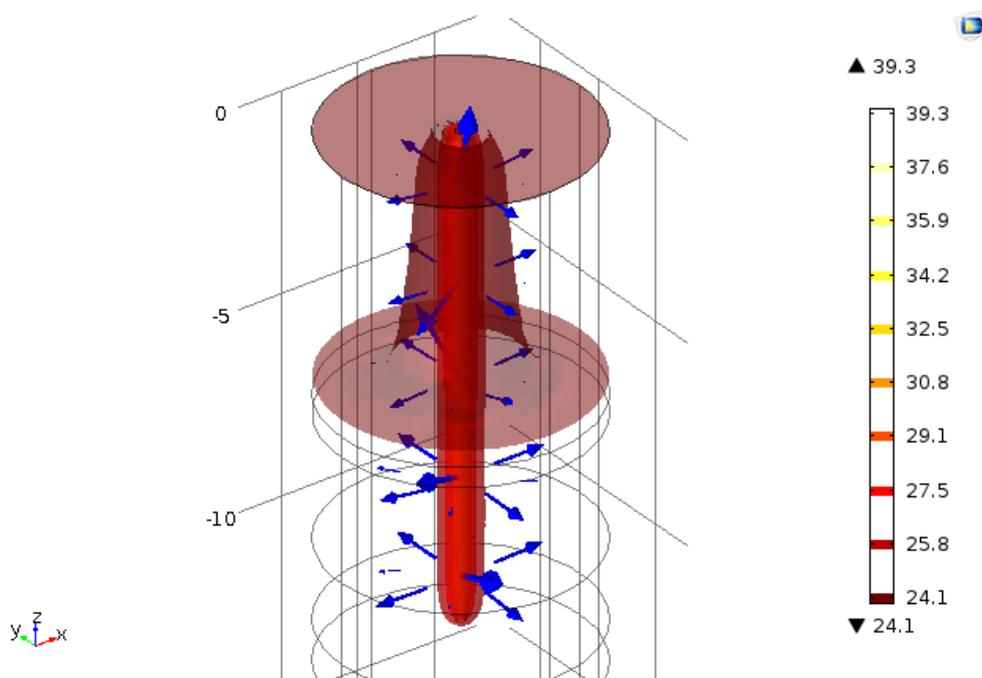


Figura 5.15 - Direção do fluxo de calor após 48h de ensaio.

Além da informação relacionada à temperatura no solo circundante, linhas isotérmicas determinam o espaço que forma o volume térmico ou bulbo térmico atuante durante as 48 horas de ensaio. Na Figura 5.16 se ilustram as linhas isotérmicas em um plano longitudinal do modelo localizado na metade da estaca de energia. Esta permite inferir que o volume térmico desenvolvido forma um tipo de bulbo similar à forma geométrica de um cilindro. Por este motivo, também é válido se aproximar definindo um raio de atuação térmica para esse bulbo. Em seguida, são realizadas seções transversais que permitem determinar o valor desse raio.

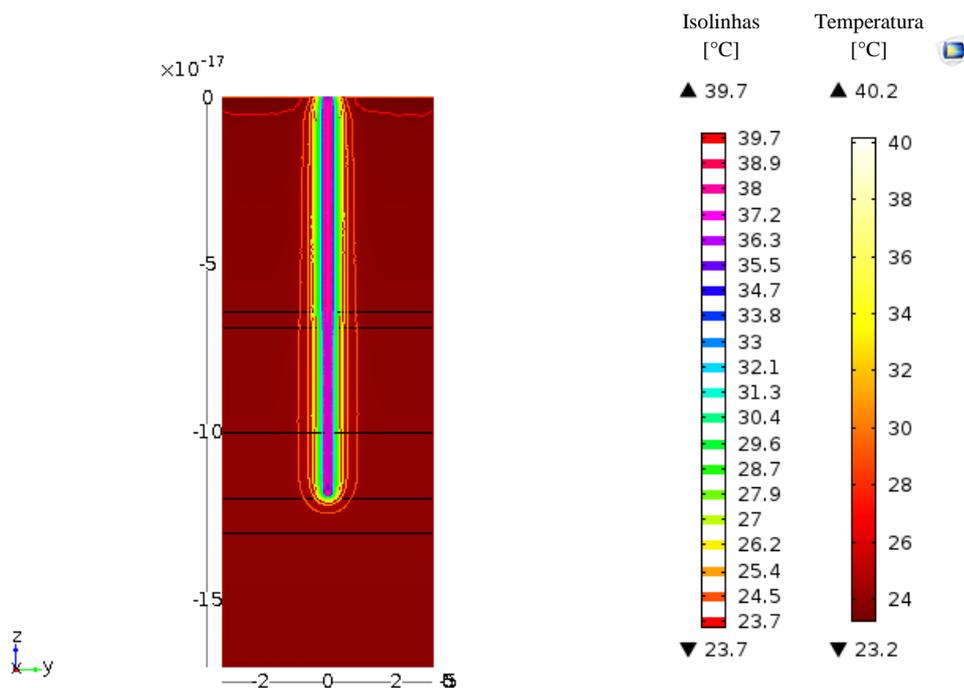


Figura 5.16 - Linhas isotérmicas em seção longitudinal do modelo após 48 h de ensaio.

Se fornecem os raios de atuação em 3 profundidades diferentes: 3 m, 6 m e 9 m. Consegue-se mostrar nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 os resultados térmicos nos planos localizados nessas profundidades. Ilustram-se as atuações térmicas provocadas pela transferência de calor entre a estaca e o solo nos planos onde se calcula o raio de atuação que determina a distância onde os efeitos térmicos provocados pela interação estaca e solo não provocam mudanças de temperatura de acordo às condições iniciais do solo. Assim, o raio médio de atuação térmica no solo, após terminar o ensaio, corresponde a cerca de 80 cm.

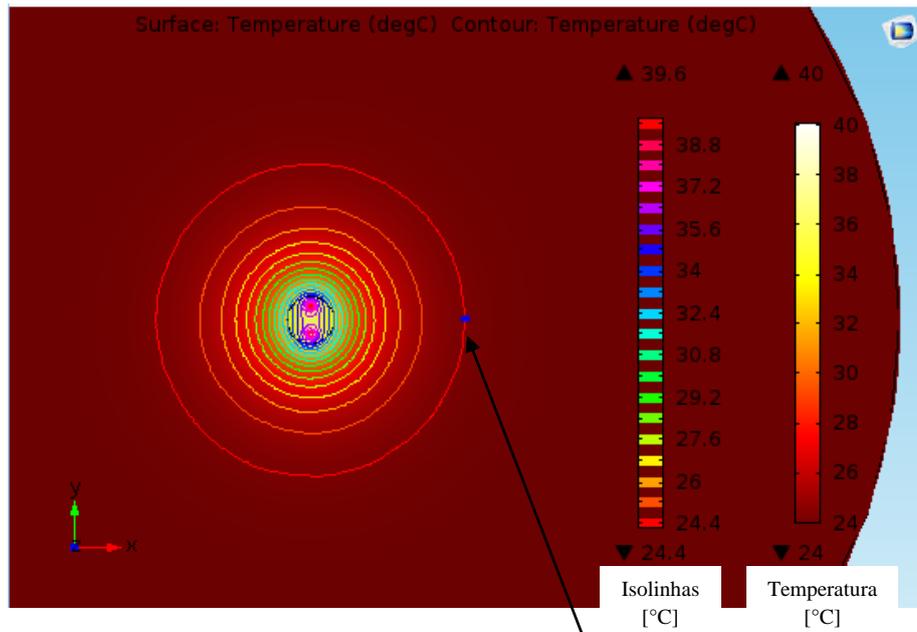


Figura 5.17 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 3 m de profundidade.

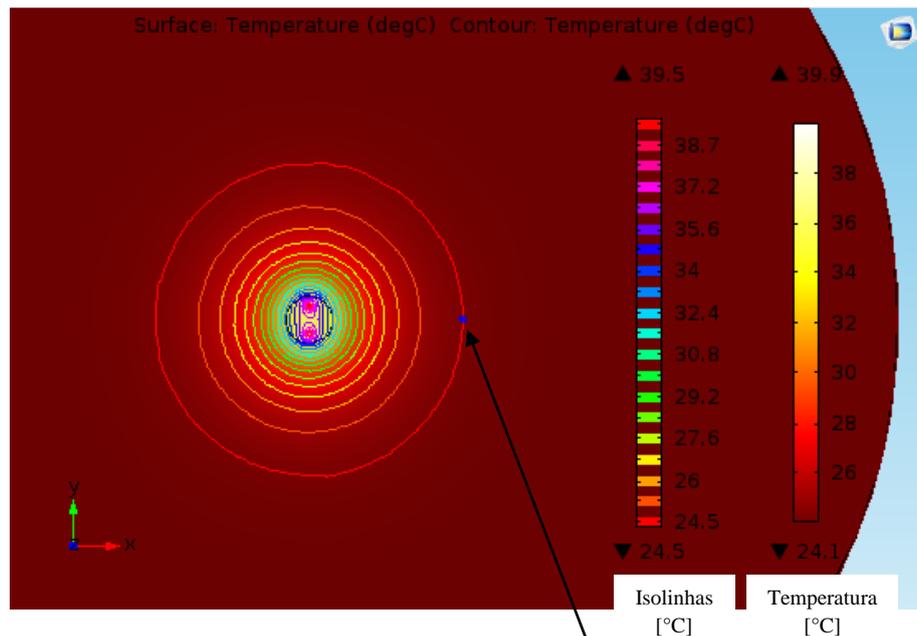


Figura 5.18 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 6 m de profundidade.

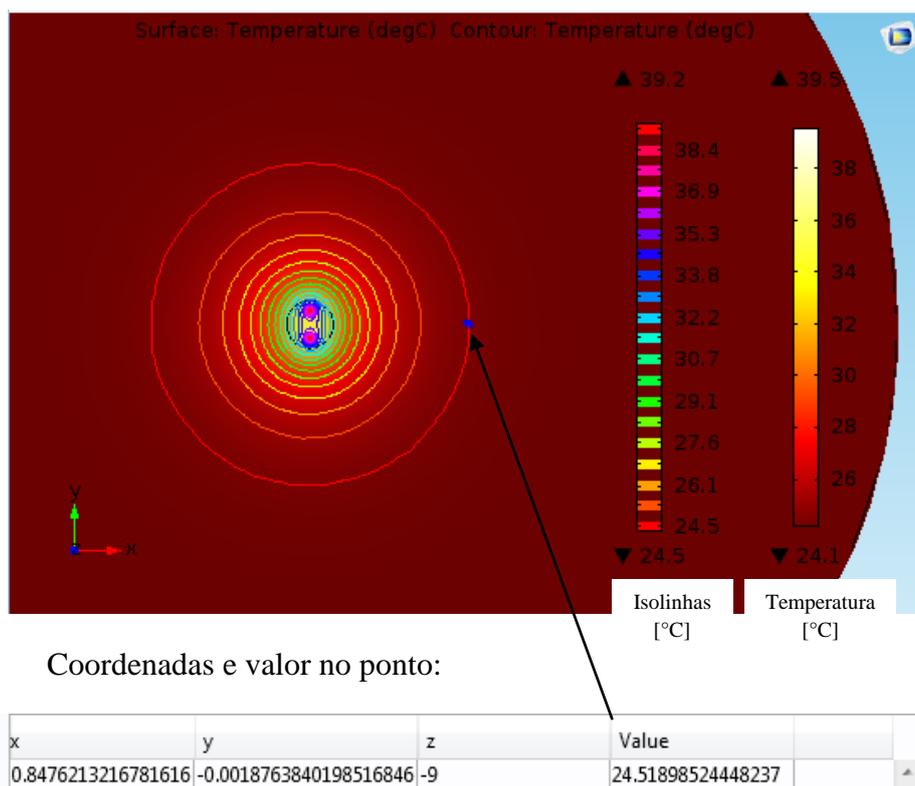


Figura 5.19 - Linhas isotérmicas na seção transversal do modelo a 9 m de profundidade.

### 5.2.5. Comparação de resultados numéricos vs experimentais

Realizou-se uma validação dos resultados numéricos do modelo térmico multicamada comparando-se com os dados medidos diretamente em campo. A Figura 5.20 mostra a sobreposição dos registros (experimentais e numéricos) de temperatura do fluido que sai tanto experimental como numérico.

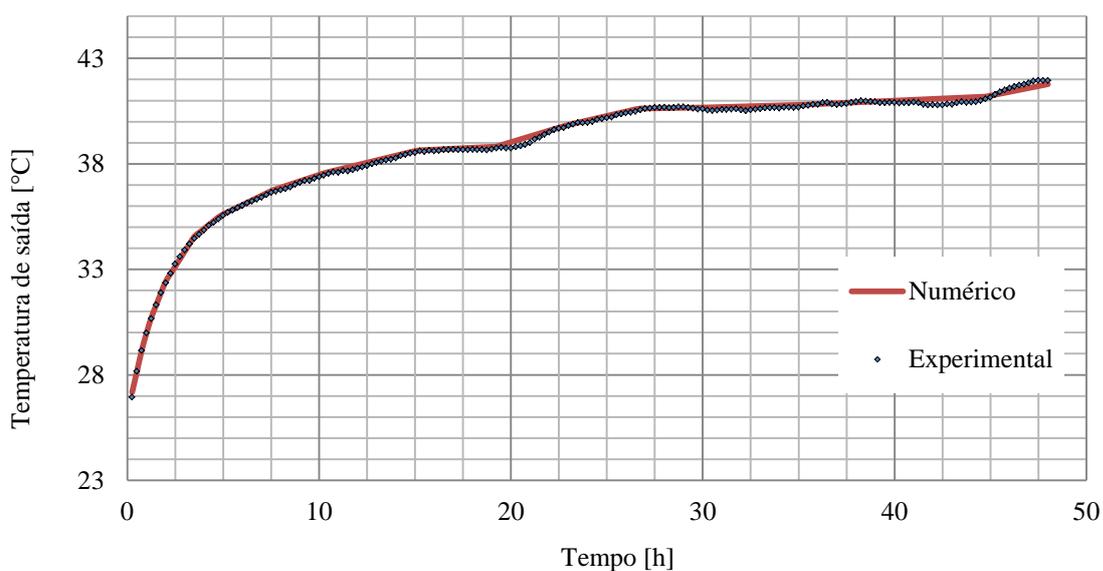


Figura 5.20 - Comparação entre as respostas experimentais e numéricas.

O erro (relativo) percentual do resultado numérico, para este caso particular, se calcula como sendo a diferença absoluta das temperaturas obtidas em cada tempo com relação ao valor de referência de temperatura que, para este caso, é o valor obtido experimentalmente. Realiza-se uma média dos erros ou variações em cada tempo, como se indica na Eqs. (43) e (44).

$$\Delta T_i = \frac{T_{\text{exp}} - T_{\text{num}}}{T_{\text{exp}}} \quad (43)$$

$$\% \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(\Delta T_i)}{n} \times 100 \quad (44)$$

Onde  $T_{\text{exp}}$  e  $T_{\text{num}}$  são as temperaturas experimentais e numéricas em determinado tempo determinado do ensaio e  $\Delta T_i$  a variação normalizada,  $\% \bar{E}$  o erro médio absoluto dos resultados numéricos e  $n$  o número de variações avaliadas (193 dados).

Obtém a Figura 5.21 que coleta os resultados em cada tempo avaliado. A variação dos resultados e encontram em uma faixa de valores entre  $-0.32 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0.27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estas correspondem a variações normalizadas (pelos resultados experimentais) entre  $-0.87\%$  e  $0.66\%$  aproximadamente, erros na resposta de temperatura considerados como muito pequenos.

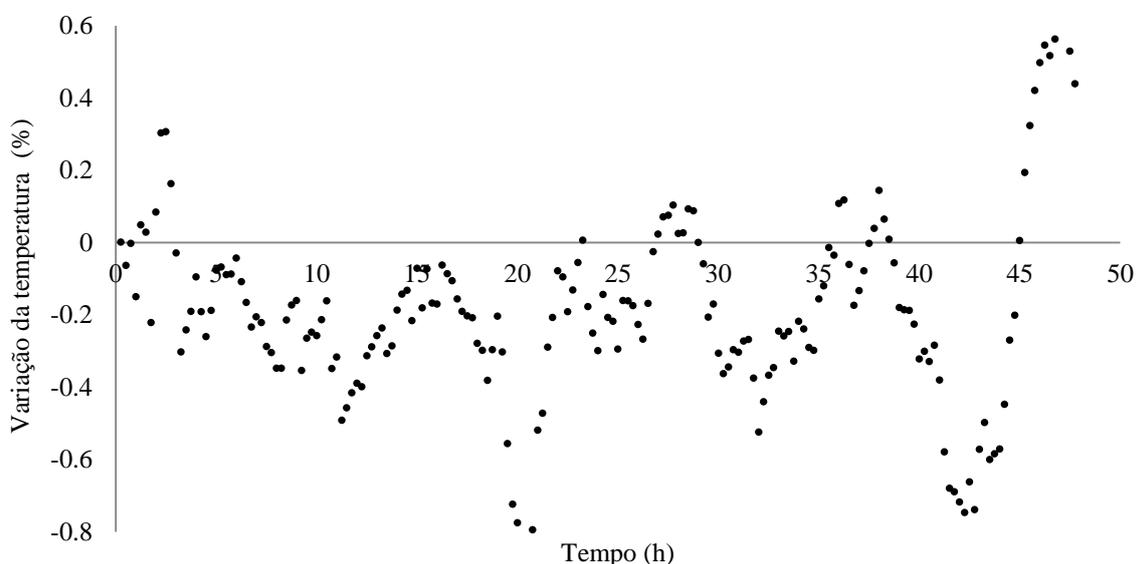


Figura 5.21 - Variação normalizada do resultado numérico respeito ao resultado experimental.

Os resultados numéricos de temperatura determinados a partir do software COMSOL Multiphysics apresentam um erro médio absoluto de aproximadamente  $0.3\%$  com respeito aos

resultados experimentais. Este erro se determina realizando a média das variações absolutas entre as temperaturas experimentais e numéricas, que se correlacionam a cada tempo de registro (cada 15 minutos).

### 5.3. MODELAGEM PARAMÉTRICA

São realizadas simulações que variam parâmetros geométricos, hidráulicos, térmicos e de configuração da tubulação que participam na determinação da troca de calor entre o solo e a estaca. Mudaram-se diâmetro e comprimento da estaca considerando os primeiros 10 m da camada mais rija do perfil geotécnico situado a 24 m de profundidade (se consideram 35 m de profundidade no modelo). Também se variam as configurações das tubulações variando o número de tubulação U simples tendo estacas com duas (2U) e três (3U) tubulações simples não acopladas entre elas (independentes), e a vazão que passa por cada configuração nos diferentes regimes do fluxo. Avalia-se a possível variação dos valores de condutividade térmica das camadas de solo e da temperatura de entrada na estaca. A determinação dos resultados permite concluir quais parâmetros são os mais importantes na obtenção do valor de troca de calor. Estes resultados dão um índice de participação da variável na sensibilidade do sistema.

Em seguida se exibem nas Tabelas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 que mostram os modelos do estudo paramétrico da troca de calor do ensaio TRT (onde TRT0 é o Id. do modelo numérico do teste padrão TRT-1 realizado experimentalmente).

Tabela 5.8 - Modelos TRT com diferentes comprimentos de estaca

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Id
1	0.25	6	U	27.8	Turbulento	Le6
2	0.25	9	U	27.8	Turbulento	Le9
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	TRT0
4	0.25	15	U	27.8	Turbulento	Le15
5	0.25	18	U	27.8	Turbulento	Le18
6	0.25	21	U	27.8	Turbulento	Le21
7	0.25	24	U	27.8	Turbulento	Le24
8	0.25	27	U	27.8	Turbulento	Le27
9	0.25	30	U	27.8	Turbulento	Le30

Onde De e Le são diâmetro e comprimento da estaca e Id é a identificação do modelo

Tabela 5.9 - Modelos TRT com diferentes de diâmetros de estaca

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Id
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	TRT0
10	0.35	12	U	27.8	Turbulento	De35
11	0.45	12	U	27.8	Turbulento	De45
12	0.55	12	U	27.8	Turbulento	De55
13	0.65	12	U	27.8	Turbulento	De65
14	0.75	12	U	27.8	Turbulento	De75
15	0.85	12	U	27.8	Turbulento	De85
16	0.95	12	U	27.8	Turbulento	De95
17	1.05	12	U	27.8	Turbulento	De105

Tabela 5.10 - Modelos TRT com diferentes vazões em diferentes tipos de tubulações

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Re	Id
20	0.25	12		1.2	Laminar	1000	VzU1.2
21	0.25	12		2.5	Laminar	2100	VzU2.5
22	0.25	12		3.5	Transiente	3000	VzU3.5
23	0.25	12	U	5.9	Turbulento	5000	VzU5.9
24	0.25	12		9.4	Turbulento	8000	VzU9.4
25	0.25	12		17.7	Turbulento	15000	VzU17.7
3	0.25	12		27.8	Turbulento	23600	TRT0
26	0.25	12		1.2	Laminar	1000	Vz2U1.2
27	0.25	12		2.5	Laminar	2100	Vz2U2.5
28	0.25	12		3.5	Transiente	3000	Vz2U3.5
29	0.25	12	2U	5.9	Turbulento	5000	Vz2U5.9
30	0.25	12		9.4	Turbulento	8000	Vz2U9.4
31	0.25	12		17.7	Turbulento	15000	Vz2U17.7
32	0.25	12		27.8	Turbulento	23600	Vz2U27.8
33	0.25	12		1.2	Laminar	1000	Vz3U1.2
34	0.25	12		2.5	Laminar	2100	Vz3U2.5
35	0.25	12		3.5	Transiente	3000	Vz3U3.5
36	0.25	12	3U	5.9	Turbulento	5000	Vz3U5.9
37	0.25	12		9.4	Turbulento	8000	Vz3U9.4
38	0.25	12		17.7	Turbulento	15000	Vz3U17.7
39	0.25	12		27.8	Turbulento	23600	Vz3U27.8

Tabela 5.11 - Modelos TRT com diferentes tubulações

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Id
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	TRT0
18	0.25	12	2U	27.8	Turbulento	NT2U
19	0.25	12	3U	27.8	Turbulento	NT3U

Tabela 5.12 - Modelos TRT com diferentes posições do nível freático

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	N.A [m]	Id
40	0.25	12	U	27.8	Turbulento	7	NA7
41	0.25	12	U	27.8	Turbulento	8	NA8
42	0.25	12	U	27.8	Turbulento	9	NA9
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	10	TRT0
43	0.25	12	U	27.8	Turbulento	11	NA11
44	0.25	12	U	27.8	Turbulento	12	NA12

Tabela 5.13 - Modelos TRT com diferentes valores de condutividade térmica para o concreto.

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	$kc$ [W/(m.K)]	Id
45	0.25	12	U	27.8	Turbulento	1.15	kc1.15
46	0.25	12	U	27.8	Turbulento	1.25	kc1.25
47	0.25	12	U	27.8	Turbulento	1.50	kc1.50
48	0.25	12	U	27.8	Turbulento	1.75	kc1.75
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	2.00	TRT0
49	0.25	12	U	27.8	Turbulento	2.25	kc2.25
50	0.25	12	U	27.8	Turbulento	2.50	kc2.50
51	0.25	12	U	27.8	Turbulento	2.75	kc2.75
52	0.25	12	U	27.8	Turbulento	3.00	kc3.00

Tabela 5.14 - Modelos TRT com valores de variação da condutividade térmica do solo

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	$\Delta k$	Id
53	0.25	12	U	27.8	Turbulento	-20%	ks-20
54	0.25	12	U	27.8	Turbulento	-15%	ks-15
55	0.25	12	U	27.8	Turbulento	-10%	ks-10
56	0.25	12	U	27.8	Turbulento	-5%	ks-05
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	0%	TRT0
57	0.25	12	U	27.8	Turbulento	5%	ks+05
58	0.25	12	U	27.8	Turbulento	10%	ks+10
59	0.25	12	U	27.8	Turbulento	15%	ks+15
60	0.25	12	U	27.8	Turbulento	20%	ks+20

Tabela 5.15 - Modelos TRT com diferentes temperaturas de entrada na estaca

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	$T_{\text{entrada}}$ [°C]	Id
61	0.25	12	U	27.8	Turbulento	30	TE30
62	0.25	12	U	27.8	Turbulento	40	TE40
63	0.25	12	U	27.8	Turbulento	50	TE50
64	0.25	12	U	27.8	Turbulento	60	TE60
65	0.25	12	U	27.8	Turbulento	70	TE70
66	0.25	12	U	27.8	Turbulento	80	TE80
67	0.25	12	U	27.8	Turbulento	90	TE90

Tabela 5.16 - Modelos TRT com diferentes espessuras na parede da tubulação

Num	De [m]	Le [m]	Tipo de tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Espessura [mm]	Id
68	0.25	12	U	27.8	Turbulento	2	ET2
3	0.25	12	U	27.8	Turbulento	3	TRT0
69	0.25	12	U	27.8	Turbulento	4	ET4
70	0.25	12	U	27.8	Turbulento	5	ET5
71	0.25	12	U	27.8	Turbulento	6	ET6
72	0.25	12	U	27.8	Turbulento	7	ET7
73	0.25	12	U	27.8	Turbulento	8	ET8
74	0.25	12	U	27.8	Turbulento	9	ET9
75	0.25	12	U	27.8	Turbulento	10	ET10

Tabela 5.17 - Modelos TRT composto por duas estacas em diferentes espaçamentos

Num	De [m]	Espaçamento [m]	Id
76	0.25	2	EEE2
77	0.25	3	EEE3
78	0.25	4	EEE4
79	0.25	5	EEE5
80	0.25	6	EEE6
81	0.25	7	EEE7
82	0.25	8	EEE8
83	0.25	9	EEE9
84	0.25	10	EEE10

### 5.3.1. Procedimento das modelagens

Na etapa de modelagem e simulação paramétrica dos ensaios TRT realizou-se um procedimento que permitiu obter cada um dos resultados das diferentes condições estudadas em cada estaca. Para esta simulação se adquiriu os módulos *Heat transfer* e *Pipe Flow* do software COMSOL que permitem análises com condições de parametrização.

O procedimento da modelagem e simulação paramétrica dos ensaios TRT consistiu nos seguintes passos:

- 1) Inserem-se os parâmetros e variáveis de entrada do modelo base (p.e comprimentos, temperaturas constantes, relações entra base e diâmetro do domínio de solo, etc). Existem diferentes modelos base, onde não se muda o diâmetro nem a configuração da tubulação.
- 2) Inserem-se as funções de contorno como a variação da temperatura superficial com o tempo, função da temperatura inicial do solo, tubulações (com água) e estaca, e a função da variação da temperatura de entrada na estaca;
- 3) Montagem da geometria global do modelo com elementos 3D (solo e estaca).
- 4) Montagem da geometria da tubulação incorporada na estaca com linhas desenhadas em planos;
- 5) Realizam-se as partições no domínio de solo correspondente às camadas de solo, nível da água freática e profundidade da estaca;
- 6) São inseridos os materiais com as respectivas características ( $k$ ,  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $e$ ) e atribuídos à geometria 3D e 1D;

- 7) Configura-se o modelo *Pipe Flow* selecionando a geometria 1D (tubulações) como tubulação;
- 8) São atribuídas as características térmicas e hidráulicas da tubulação e do fluido como a informação nodal (p.e modelo de fricção da tubulação, condições iniciais de pressão e temperatura, vazão e características geométricas e térmicas da tubulação). Configura-se a interação térmica entre a estaca e a tubulação;
- 9) Atribuem-se as características térmicas (condições de contorno) e as condições iniciais dos domínios sólidos;
- 10) Realiza-se a configuração da malha e dos elementos finitos;
- 11) Adota-se e configura-se um estudo transitório (dependente do tempo) definindo os tempos de início, de análise e final do estudo;
- 12) Configura-se a opção de estudo de casos paramétricos *Parametric Sweep*. Nesta opção se selecionam as variáveis que variam no modelo base;
- 13) Finalmente, inicia-se a simulação paramétrica do ensaio TRT.

### 5.3.2. Processamento dos resultados

Resultados obtidos por meio do software COMSOL Multiphysics são registrados para o posterior processamento da informação e análise. A evolução da temperatura na saída de cada tubulação é o registro mais importante para se determinar a eficiência térmica de cada caso simulado. Conhecida a temperatura de entrada se determina a eficiência térmica do sistema calculando o calor trocado  $Q$  e  $Q_L$ .

O software COMSOL permite guardar os registros de temperatura nos nós indicados do modelo, que para este caso seriam os correspondentes à saída de cada tubulação na estaca. Estes registros se guardam em arquivos tipo *.csv* que contém em duas colunas o tempo e a temperatura de saída na respectiva tubulação.

Com os dados de cada arquivo se procede ao cálculo da diferença da temperatura entre a entrada e saída. Considerando os valores médios de capacidade térmica específica e da densidade da água calcula-se o fluxo de calor trocado para cada tempo de registro (somam-se os resultados da taxa de extração de calor para estacas com mais de uma tubulação). Depois, se realiza uma média aritmética dos valores do fluxo de calor trocado para cada tempo, obtendo assim o valor médio do fluxo de calor ou trabalho realizado pelo conjunto de estaca por metro de comprimento. Com estes resultados se comparam os diferentes valores dos diferentes modelos e se procede à análise dos resultados.

Determina-se sempre uma variação entre os resultados energéticos entre o resultado energético dos modelos paralelos e o padrão por meio da Eq (43):

$$\text{Variação} = \frac{\text{Resultado} - \text{Resultado}_{\text{TRT0}}}{\text{Resultado}_{\text{TRT0}}} \times 100 \quad (43)$$

Onde Resultado é o qualquer valor obtido durante a simulação (taxa de troca de calor total ou normalizada) e Resultado<sub>TRT0</sub> é o qualquer resultado numérico obtido para o ensaio TRT0.

### **5.3.3. Resultados da simulação paramétrica**

Na estimativa de resultados, obtêm-se os valores de calor trocado e fluxo de calor de cada modelo de estaca. Em cada caso de estudo determina-se a maior taxa de troca de calor para determinar as possíveis condições que mudem a configuração original para deduzir a relação ótima de funcionamento do sistema. A seguir, são mostrados os resultados de cada estudo paramétrico.

#### **5.3.3.1. Comprimento da estaca**

A estaca trocadora de calor com comprimento ( $L_e$ ) de 12 m é submetida à variação do comprimento para determinar a evolução térmica de cada caso, estudando assim os resultados do fluxo de calor na medida em que o comprimento da estrutura é menor ou maior ao valor original. Estudam-se comprimentos de 6 m, 12 m, 18 m, 24 m e 30 m para a estaca.

Depois de realizar as simulações, são calculados os respectivos valores de troca de calor por segundo e fluxo de calor normalizado pelo comprimento da estaca. Na Tabela 5.18, se resumem os resultados médios de calor transferido e fluxo de calor. Com estacas de 6 m como comprimento mínimo de análise, obtêm-se um calor transferido de 374 W, no entanto a estaca de 30 m consegue trocar 1853 W. Pode-se atingir a diferença de 1480 W entre os modelos de 6 m e 30 m. Esta diferença demonstra que o aumento do comprimento ajuda no crescimento da taxa de transferência de calor entre os elementos.

Tabela 5.18 - Resultados da troca de calor considerando a variação do comprimento da estaca.

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
Le6	0.25	6	U	27.8	Turbulento	374.00	62.33
Le9	0.25	9	U	27.8	Turbulento	575.38	63.93
TRT0	0.25	12	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
Le15	0.25	15	U	27.8	Turbulento	972.81	64.85
Le18	0.25	18	U	27.8	Turbulento	1153.70	64.09
Le21	0.25	21	U	27.8	Turbulento	1281.05	61.00
Le24	0.25	24	U	27.8	Turbulento	1468.00	61.17
Le27	0.25	27	U	27.8	Turbulento	1658.41	61.42
Le30	0.25	30	U	27.8	Turbulento	1853.80	61.79

Além desta diferença, comparando cada resultado com o modelo padrão de 12 m de comprimento, a troca de calor pode variar -52.5% se o comprimento da estaca muda para 6 m, -26.9% para 9 m, 23.6% para 15 m, 46.6% para 18 m, 62.8% para 21 m, 86.6% se muda para 24 m, 110.8% para 27 m e 135% se muda para 30 m. Adicionalmente, o fluxo de calor por metro de comprimento muda -4.9% ao variar o comprimento para 6 m, -2.5% para 9 m, -1.1% para 15 m, -2.3% para 18 m, -7.0% para 21 m, -6.7% para 24 m, -6.3% para 27 m, e finalmente 5.8% para 30 m.

Existe uma relação diretamente proporcional entre o calor transferido no solo modelado e o comprimento da estaca, onde com maior comprimento se atinge cada vez uma maior troca de calor com o solo. De acordo com a Figura 5.22 a relação entre duas variáveis para o caso particular segue uma tendência linear. Claramente se pode ver uma redução da troca de calor depois dos 21 m, que não é representativa para os níveis de troca de calor apresentados.

Embora os resultados de calor trocado tenham um comportamento linear com o comprimento, o fluxo de calor por comprimento de estaca mostra um comportamento diferente já que o fluxo de calor normalizado não guarda uma proporção ou relação com o comprimento da estaca. A Figura 5.23 ilustra os resultados de troca de calor por comprimento, o que ilustra a efetividade da troca de calor em estacas de 12 m entre os comprimentos avaliados. Existe aumento na efetividade da troca depois dos 24 m de comprimento, depois do solo mudar para a camada de tipo residual.

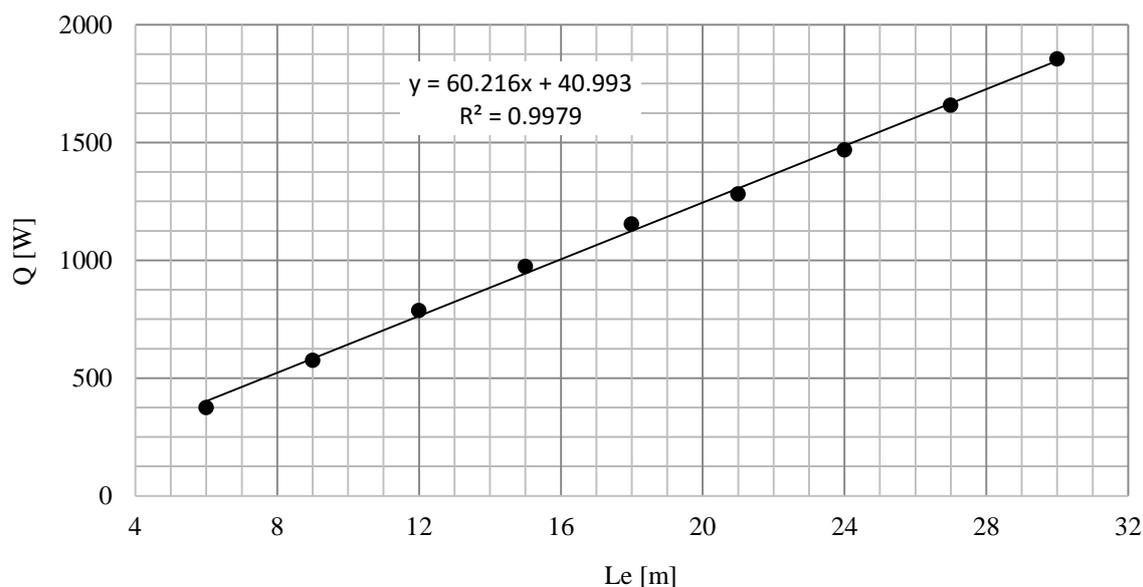


Figura 5.22 - Taxas de troca de calor total considerando variação no comprimento na estaca.

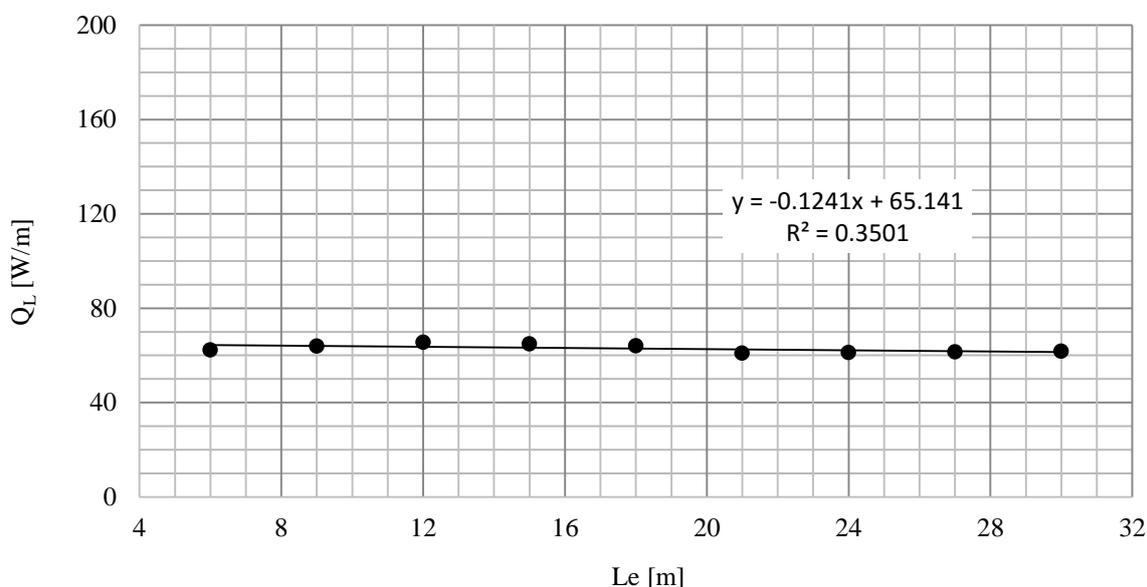


Figura 5.23 - Taxas de troca de calor normalizada considerando variação no comprimento.

### 5.3.3.2. Diâmetro da estaca

A estaca trocadora de calor originalmente com 25 cm de diâmetro se simula com diâmetros ( $D_e$ ) de 35 cm, 45 cm, 55 cm, 65 cm, 75 cm, 85 cm, 95 cm e 105 cm. A análise destes casos fornece o diâmetro ótimo e a participação da mudança do parâmetro na troca de calor.

Portanto depois de obter as respostas térmicas de cada caso, se procede a determinação dos valores de taxa de calor trocado e normalizado pelo comprimento de estaca. De acordo com a Tabela 5.19 a taxa de troca de calor para uma estaca de 12 m de comprimento configurado com tubulação em U simples pode variar desde 786.8 W até 1012.7 W, logrando

assim uma diferença de calor trocado próximo aos 245 W. Ao mudar o diâmetro, essa diferença representa um intervalo na eficiência de 65.57 W/m até 86.35 W/m.

Tabela 5.19 - Resultados da troca de calor considerando a variação do comprimento da estaca.

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
TRT0	0.25	12	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
De35	0.35	12	U	27.8	Turbulento	814.24	67.85
De45	0.45	12	U	27.8	Turbulento	927.33	77.28
De55	0.55	12	U	27.8	Turbulento	919.67	76.64
De65	0.65	12	U	27.8	Turbulento	942.28	78.52
De75	0.75	12	U	27.8	Turbulento	962.49	80.21
De85	0.85	12	U	27.8	Turbulento	1018.14	84.85
De95	0.95	12	U	27.8	Turbulento	1036.25	86.35
De105	1.05	12	U	27.8	Turbulento	1012.68	83.97

Devido à proporcionalidade que existe entre a taxa de calor trocado e a eficiência da troca por comprimento, a diferença na variação para cada variável é a mesma ao mudar o diâmetro da estaca, ou seja, se uma estaca de 0.25 m de diâmetro muda para 0.35 m, tanto o fluxo de calor com e sem normalizar aumenta em 3.5% a mais para estaca com diâmetro de 30 cm, 17.9% para 0.45 m, 16.9% para 0.55 m, 19.8% para 0.65 m, 22.3% para 0.75 m, 29.4% para 0.85 m, 31.7% para 0.95 m e finalmente 28.7% se a estaca muda o diâmetro para 1.05 m.

Na Figura 5.24 observa-se a trajetória da troca de calor por comprimento de estaca devido à mudança do diâmetro. Observa-se que existe uma taxa de variação relativamente altas nos dois resultados entre os diâmetros de 0.25 m e 0.65 m, e uma pequena variação entre os diâmetros de 0.65 m, 0.75 m e 0.85 m. Logo a estaca aumenta a taxa de troca de calor até atingir os 0.95 m de diâmetro.

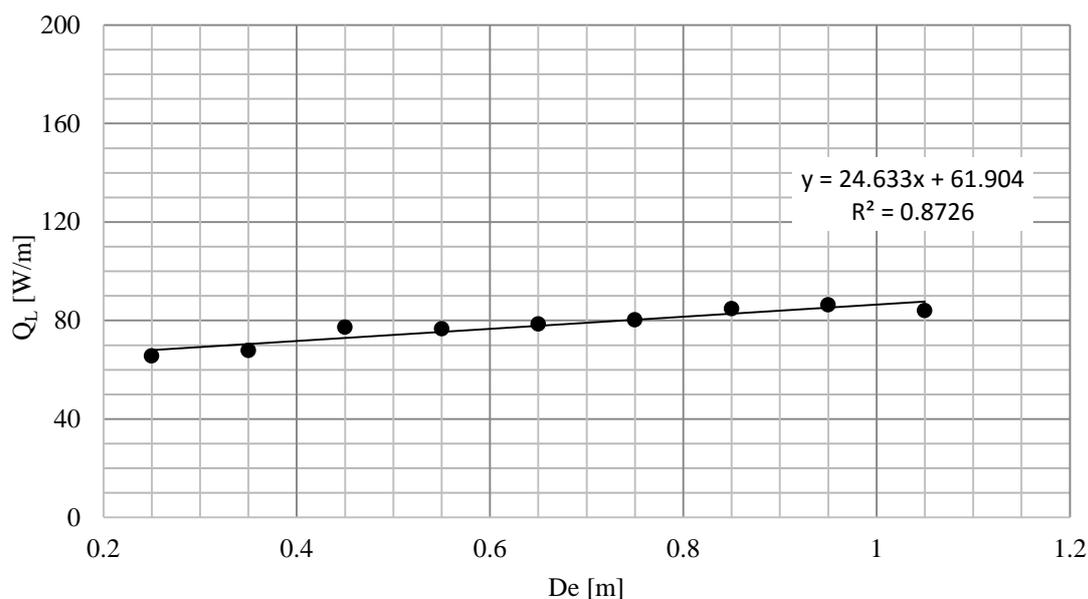


Figura 5.24 - Taxas de troca de calor considerando diferentes diâmetros na estaca.

### 5.3.3.3. Número de tubulações

Dentro da análise paramétrica se consideraram as mudanças no número de tubulações (NT), adicionando tubulações tipo U simples até se completar uma configuração de 3 tubulações na mesma estaca. Simulam-se as tubulações sempre guardando uma cobertura de concreto de 5 cm, com espaçamento simétrico entre cada tubulação no caso de duas tubulações U, e as mesmas distâncias entre tubulações de saída e entrada no caso do sistema de tubulação triplo U, como se ilustra na Figura 5.25. O aumento do número máximo de tubulações se encontra limitado a 3 tubulações U devido ao espaço que determina o diâmetro de 25 cm da estaca.

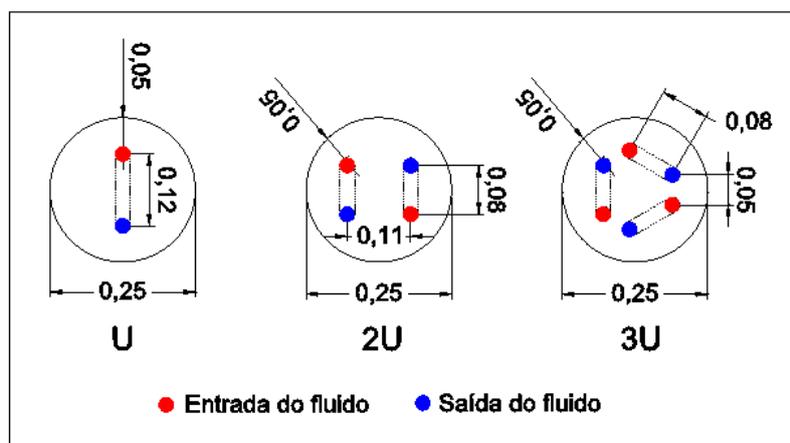


Figura 5.25 - Configurações de estacas com tubulação U simples, duplo U e triplo U.

Os resultados da resposta térmica são mostrados na Tabela 5.20. Neste caso, na medida em que se adicionam tubulações à estaca o sistema transfere maior calor ao solo aumentando assim, de maneira proporcional, a efetividade da troca de calor por comprimento. A adição de até 2 tubulações no sistema atinge uma taxa de troca de calor de  $Q=2132$  W, enquanto a adição de uma tubulação U visa a troca de  $Q=1670.5$  W.

Tabela 5.20. Resultados da troca de calor considerando a variação do número de tubulações.

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	$Q_L$ [W/m]
TRT0	0.25	12	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
NT2U	0.25	12	2U	27.8	Turbulento	1670.55	139.21
NT3U	0.25	12	3U	27.8	Turbulento	1841.17	153.43

Com estes resultados, observa-se que ao colocar uma tubulação adicional ao modelo padrão se consegue uma variação positiva de 112% e 134% ao se adicionar duas tubulações. A Figura 5.26 mostra a quantidade de fluxo de calor que se consegue trocar em cada configuração de estaca. A adição de uma tubulação no sistema pode atingir um fluxo de calor de até 139.2 W/m, enquanto a adição de duas tubulações U permite trocar 153 W/m. Observa-se que a eficiência das estacas diminui consideravelmente na medida em que se adicionam tubulações passando de uma variação energética de 112% conseguido por um sistema duplo U para 10% conseguido de passar de um sistema de duas tubulações para três tubulações U.

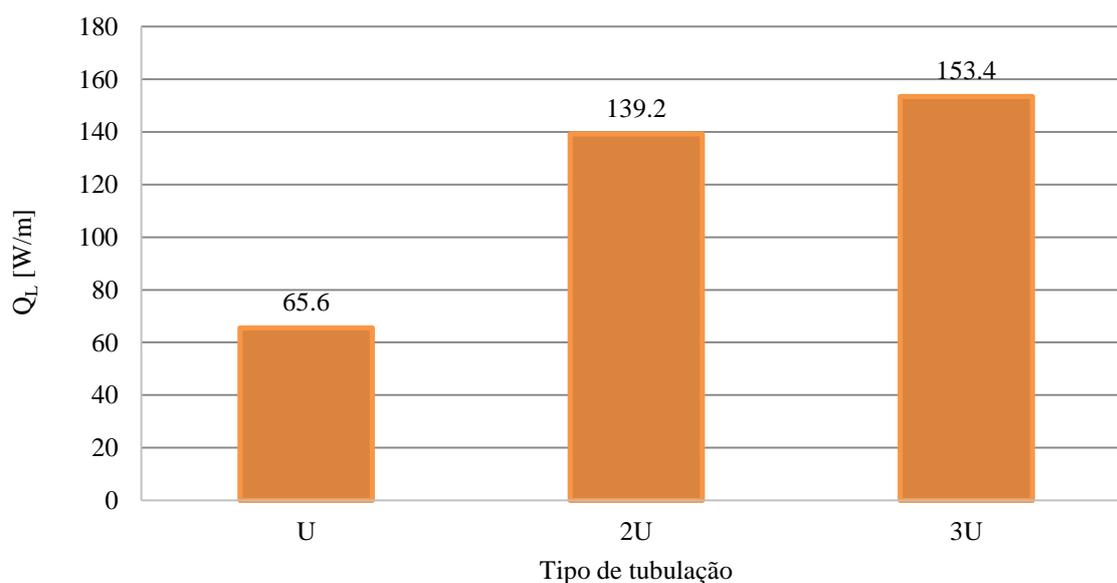


Figura 5.26 - Taxas de troca de calor considerando o número de tubulações.

### 5.3.3.4. Vazão nos diferentes tipos de tubulação

Para cada configuração de tubulação se simulou a vazão do fluido circundante. No caso real, a estaca de energia foi testada com uma vazão média de 27.8 l/min ( $4.63E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sendo este um fluxo completamente turbulento ( $Re \approx 23000$ ). Variou-se o parâmetro hidráulico simulando fluxo laminar, transitório e turbulento em cada sistema de tubulação. Consideraram-se vazões localizadas nos regimes laminar ( $Re < 2100$ ), transição ( $2100 < Re < 4000$ ), turbulento e completamente turbulento ( $Re > 4000$ ), por isto, de 1.2 l/min ( $1.96E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 2.5 l/min ( $4.12E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 3.5 l/min ( $5.89E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 5.9 l/min ( $9.82E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 9.7 l/min ( $1.57E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ ), e finalmente, de 17.7 l/min ( $2.95E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Na Tabela 5.21 são mostrados os resultados de troca de calor com a variação da vazão hidráulico considerando tubulação U simples (VzU). Com esta configuração estacas com fluxo laminar de  $1.96E-05 \text{ m}^3/\text{s}$  puderam transferir até 490.1 J cada segundo (40.84 W/m). No entanto, este valor pode aumentar se a vazão na tubulação aumenta considerando fluxo completamente turbulento de 27.8 l/min, atingindo assim os 786.8 J/s (65.57 W/m). Nesse contexto, vazões de 2.5 l/min, 3.5 l/min, 5.9 l/min, 9.7 l/min e 17.7 l/min conseguem como consequência a transferência de calor a uma taxa nominalizada de 53.3 W/m, 55.7 W/m, 59.7 W/m, 63.5 W/m, 64.3 W/m respectivamente.

Tabela 5.21 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em uma tubulação U

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
VzU1.2	0.25	12	U	1.2	Laminar	490.10	40.84
VzU2.5	0.25	12	U	2.5	Laminar	638.98	53.25
VzU3.5	0.25	12	U	3.5	Transitório	668.65	55.72
VzU5.9	0.25	12	U	5.9	Turbulento	716.23	59.69
VzU9.4	0.25	12	U	9.4	Turbulento	761.82	63.48
VzU17.7	0.25	12	U	17.7	Turbulento	772.08	64.34
TRT0	0.25	12	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57

Para sistemas com tubulação duplo U (Vz2U) mostram-se os resultados na Tabela 5.22. Observa-se que com uma tubulação adicional a troca de calor aumenta consideravelmente acrescentando a vazão do fluido. Desse modo, e atendendo as mesmas condições, a variação da vazão tem como efeito o aumento do fluxo de calor durante o ensaio

para os mesmo valores de vazão simulados no caso anterior. Ao intervalo de ação térmica acrescentam-se valores de 60.4 W/m com fluxo laminar, até 139.1 W/m para um fluxo completamente turbulento. De igual forma, com vazões de 2.5 l/min, 3.5 l/min, 5.9 l/min, 9.7 l/min e 17.7 l/min se atingem taxas de fluxo de calor de 69.3 W/m, 76.6 W/m, 76.2 W/m, 81.7 W/m, 88.6 W/m respectivamente.

Tabela 5.22 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em sistema de tubulações com 2 tubulações U.

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
Vz2U1.2	0.25	12	2U	1.2	Laminar	725.30	60.44
Vz2U2.5	0.25	12	2U	2.5	Laminar	831.68	69.31
Vz2U3.5	0.25	12	2U	3.5	Transitório	919.42	76.62
Vz2U5.9	0.25	12	2U	5.9	Turbulento	914.33	76.19
Vz2U9.4	0.25	12	2U	9.4	Turbulento	980.59	81.72
Vz2U17.7	0.25	12	2U	17.7	Turbulento	1063.63	88.64
Vz2U27.8	0.25	12	2U	27.8	Turbulento	1670.55	139.21

Finalmente, ilustra-se os resultados na Tabela 5.23 com a variação da vazão em sistemas de 3 tubulações U (Vz3U). Da mesma forma, observam-se aumentos no fluxo de calor ao se aumentar o número de tubulações em relação ao caso anterior. Também se pode conferir o aumento geral da troca de calor com o acréscimo de vazão nas tubulações. De igual forma que no caso anterior, se consideram fluxos de 2.5 l/min, 3.5 l/min, 5.9 l/min, 9.7 l/min e 17.7 e 27.8 l/min. Como resultado, as taxas de troca de calor para cada vazão avaliada são respectivamente de 71.1 W/m, 76.2 W/m, 82.6 W/m, 82.8 W/m, 87.6 W/m, 97.8 W/m e 153.4 W/m.

Tabela 5.23 - Resultados da troca de calor considerando a variação da vazão do fluido em um sistema de tubulações com 3 tubulações U.

Id	De [m]	Le [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
Vz3U1.2	0.25	12	3U	1.2	Laminar	853.67	71.14
Vz3U2.5	0.25	12	3U	2.5	Laminar	913.87	76.16
Vz3U3.5	0.25	12	3U	3.5	Transitório	991.06	82.59
Vz3U5.9	0.25	12	3U	5.9	Turbulento	993.29	82.77
Vz3U9.4	0.25	12	3U	9.4	Turbulento	1050.62	87.55
Vz3U17.7	0.25	12	3U	17.7	Turbulento	1173.10	97.76
Vz3U27.8	0.25	12	3U	27.8	Turbulento	1841.17	153.43

Todos os resultados anteriormente mostrados são resumidos na Figura 5.27, onde se ilustra o comportamento do fluxo com a mudança da vazão e o número de tubulações. Nota-se que para a estaca com tubulação U simples existe particularmente uma limitação na troca de calor de acordo com as características e condições de capacidade e condutividade térmica dos materiais. Após experimentar 9.4 l/min, a estaca de energia não considera uma diferença representativa na troca de calor, podendo-se inferir assim que após experimentar o fluxo completamente turbulento existe a independência do fluxo de calor resultante com a variação da vazão no sistema de tubulação. Considera-se que o fluxo de calor atinge uma taxa de troca de calor limite máximo que se encontra entre 63 W/m e 66 W/m.

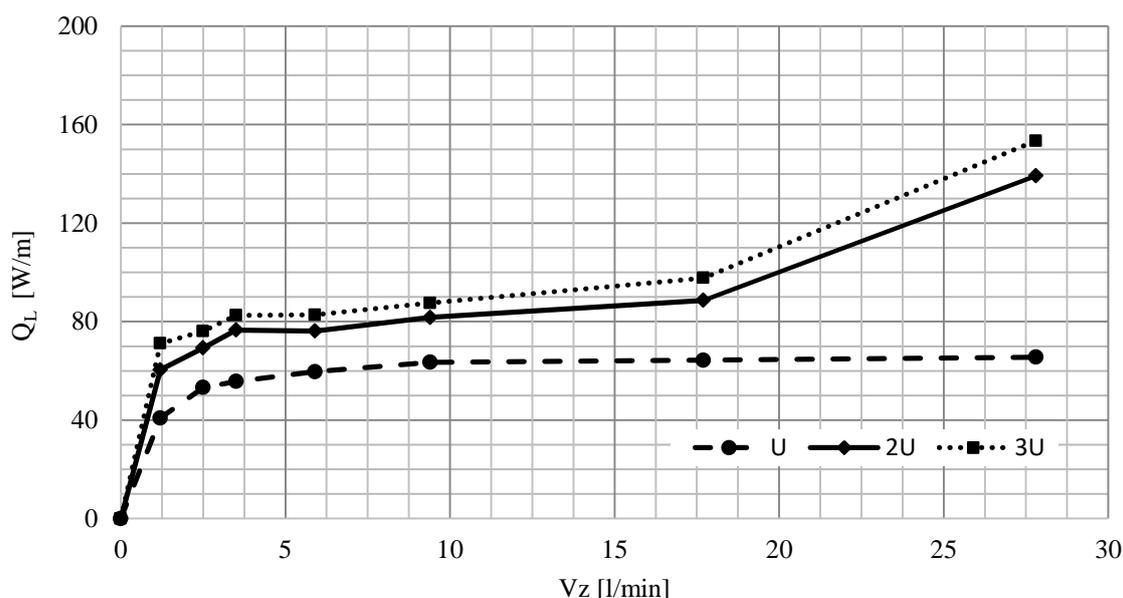


Figura 5.27 - Taxas de troca de calor considerando as diferentes configurações de tubulação e vazões.

Ao se colocar uma segunda tubulação no sistema de estaca, esta altera as condições do fluxo térmico. A taxa de troca de calor tende a aumentar em todas as vazões dentro dos regimes laminares e transitório entre 30% e 50%, mas quando o fluxo entra num regime turbulento, este começa a aumentar a efetividade térmica da estaca aumentando assim o fluxo de calor até duplicar a troca. Também se consegue distinguir a troca de calor constante durante o fluxo transitório, onde independentemente da vazão existe uma vazão constante que está na faixa dos 76 W/m.

Finalmente, com a colocação de uma terceira tubulação U no sistema de estaca se obtém o acréscimo da resposta térmica durante a troca de calor com o solo. Para este caso particular a terceira tubulação ajuda entre 7% a 20% no aumento do fluxo de calor comparado com o sistema de duas tubulações U. Mesmo que no sistema de estaca com duas tubulações a forma da trajetória seja similar à configuração com 3 tubulações, o fluxo de calor não vai depender da vazão no regime transitório. Além disto, também se aumenta em grande importância o fluxo de calor com o aumento da vazão na região completamente turbulenta. De forma geral, a trajetória do sistema de 3 tubulações segue de forma "paralela" o fluxo de calor do sistema de duas tubulações após ter um fluxo transitório.

Nota-se que nos resultados de troca de calor nas configurações 2U e 3U ao se aumentar a fluxo de calor com a vazão experimentada cresce de forma não linear, diferente que na configuração U-simples (U). Pode-se explicar este comportamento de aumento da taxa de troca de calor já que a interação entre as tubulações e a estaca em uma determinada vazão estudada gera como resultado a mesma diferença de temperatura entre a temperatura entrante e de saída em cada tubulação U. Porém, a diferença de temperatura média entre entrada e saída para cada tubulação U vem sendo menor na medida em que se aumenta a vazão nas tubulações. É assim que o total das diferenças de temperatura cada vez aumenta com o aumento da velocidade do fluido circundante e a taxa de troca aumenta com o aumento do fluxo no regime turbulento. Este fenômeno não se observa na configuração U-simples devido que a diferença de temperatura média entre a entrada e saída se torna menor ao aumento da vazão, tendo assim uma proporção constante entre elas gerando que a taxa de troca de calor sempre fique constante no estado de fluxo turbulento.

### **5.3.3.5. Posição do nível de água freática**

Resultados da mudança de posição do nível de água freática são obtidos a partir do modelo padrão que originalmente foi modelado com 10 m de profundidade para o nível de

água freática. A posição da água freática foi modelada em 5 diferentes profundidades do perfil de solo definidas a cada 1 m a partir de 7m até 12 m de profundidade. Esta faixa de ação foi definida pelos resultados de investigações de campo (ver Item 4.2.2) como uma faixa onde se varia o nível de água freática durante o ano. Claramente a posição deste nível de água define a mudança direta de propriedades térmicas, como a condutividade térmica e a capacidade calorífica específica do solo.

Na Tabela 5.24 mostram-se os resultados da troca de calor relacionados à variação do nível freático de água. A taxa de calor transferido varia entre 795.1 J/s e 740.4 J/s quando este nível de água varia entre 7 m e 12 m. Avaliados os níveis de 7 m, 8 m, 9 m, 11 m e 12 m de profundidade, o fluxo de calor atingido para estes respectivos casos são de 66.3 W/m, 66.0 W/m, 65.8 W/m, 65.4 W/m e 65.2 W/m respectivamente. O nível da efetividade térmica varia para cada posição simulada (com respeito ao modelo padrão TRT0 com N.A=10 m) em 1.05%, 0.66%, 0.30%, -0.33% e -0.62% correspondentemente, o que leva a se concluir que a localização do nível de água a 7 m de profundidade atinge um ótimo resultado em termos de eficiência térmica  $Q_L$ . A variação do resultado não é muito importante entre as diferentes posições do nível de água, o que não muda, representativamente, o resultado final da troca de calor com a mudança do parâmetro.

Tabela 5.24 - Resultados da troca de calor considerando a variação do nível da água freática

Id	$D_e$ [m]	$L_e$ [m]	N.A [m]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
							Q [W]	$Q_L$ [W/m]
NA7	0.25	12	7	U	27.8	Turbulento	795.06	66.25
NA8	0.25	12	8	U	27.8	Turbulento	792.05	66.00
NA9	0.25	12	9	U	27.8	Turbulento	789.12	65.76
TRT0	0.25	12	10	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
NA11	0.25	12	11	U	27.8	Turbulento	784.25	65.35
NA12	0.25	12	12	U	27.8	Turbulento	781.93	65.16

A Figura 5.28 mostra a evolução do fluxo de calor considerando as variações do nível da água freática do modelo padrão. Ilustra-se uma tendência linear que indica a relação de proporcionalidade entre a posição do nível de água e o fluxo de calor médio trocado. Isto determina uma taxa de variação do fluxo de calor normalizado de -0.22 W/m por cada metro de variação do o nível freático de água. Esta relação linear se dá devido à flutuação do

parâmetro na mesma camada de solo, sem experimentar variação de propriedades térmicas que influem na relação entre o calor trocado e a profundidade do nível de água freática.

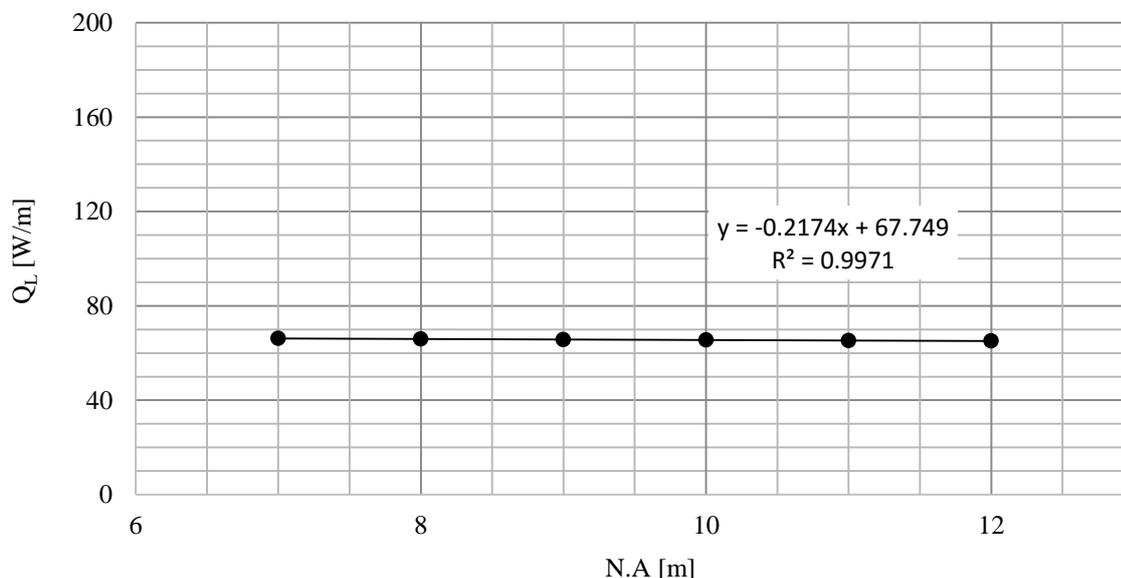


Figura 5.28 - Taxas de troca de calor considerando diferentes profundidades do nível freático.

### 5.3.3.6. Condutividade térmica do concreto

A variação da condutividade térmica do concreto ( $kc$ ) se estuda com o objetivo de se avaliar a sensibilidade e a influência do parâmetro na troca de calor. De acordo com os regulamentos europeus (IGSHPA), as estacas de energia não devem ser projetadas com valores maior a 1.5 W/(m.K) (ver Item 2.5.2). Por este motivo, foram avaliados valores de condutividade térmica no concreto da estaca entre 1.15 W/(m.K) e 3 W/(m.K). Mesmo assim, o valor da condutividade do concreto uma vez moldado e curado não varia consideravelmente seu peso específico (em condições normais de fabrica). Portanto, as pequenas variações no deste parâmetro geram como resultado uma pequena mudança na condutividade térmica, que não induz em grandes variações no resultado do fluxo de calor, mas que segue com a lei resultante obtida nos resultados. O presente estudo mostra abreviadamente os resultados indiretos do comportamento térmico do material da estaca utilizando diferentes misturas de concretos.

Na Tabela 5.25 se apresentam resultados das simulações realizadas para este caso de análise paramétrica. Observa-se que a taxa de calor transferido vai aumentando na medida em que o valor da condutividade térmica do concreto aumenta. É possível se obter para valores de 1.15 W/m.K, 1.25 W/m.K, 1.50 W/m.K, 1.75 W/m.K, 2.00 W/m.K, 2.25 W/m.K, 2.52 W/m.K, 2.75 W/m.K e 3.00 W/m.K taxas de calor de calor normalizada ( $Q_L$ ) de

51.7 W/m, 53.8 W/m, 58.4 W/m, 62.3 W/m, 65.6 W/m, 68.4 W/m, 70.9 W/m, 73.1 W/m e 75.0 W/m respectivamente. Este resultado indica que a variação de 0.25 unidades na condutividade térmica pode provocar uma variação significativa no fluxo de calor entre 2 W/m e 4 W/m, o que demonstra uma alta sensibilidade da variável em estudo.

Tabela 5.25 - Resultados da troca de calor considerando a variação da condutividade térmica do concreto da estaca.

Id	D <sub>e</sub> [m]	L <sub>e</sub> [m]	k <sub>c</sub> [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Resultados	
						Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
kc1.15	0.25	12	1.15	U	27.8	620.72	51.73
kc1.25	0.25	12	1.25	U	27.8	646.08	53.84
kc1.50	0.25	12	1.50	U	27.8	700.62	58.38
kc1.75	0.25	12	1.75	U	27.8	747.19	62.27
TRT0	0.25	13	2.00	U	27.8	786.81	65.57
kc2.25	0.25	14	2.25	U	27.8	820.97	68.41
kc2.50	0.25	15	2.50	U	27.8	850.71	70.89
kc2.75	0.25	16	2.75	U	27.8	876.89	73.07
kc3.00	0.25	17	3.00	U	27.8	900.09	75.01

Os resultados anteriores podem ser representados na Figura 5.29 onde se pode observar a evolução do comportamento térmico da estaca com a variação da condutividade térmica. Nota-se que a evolução não linear ajustada com uma equação polinomial que indica a relação entre a variável e o fluxo de calor normalizado por comprimento de estaca. A variação experimentada devido à mudança da condutividade térmica, relacionada a diferentes tipos de materiais, pode incrementar de 51 W/m a 75 W/m.

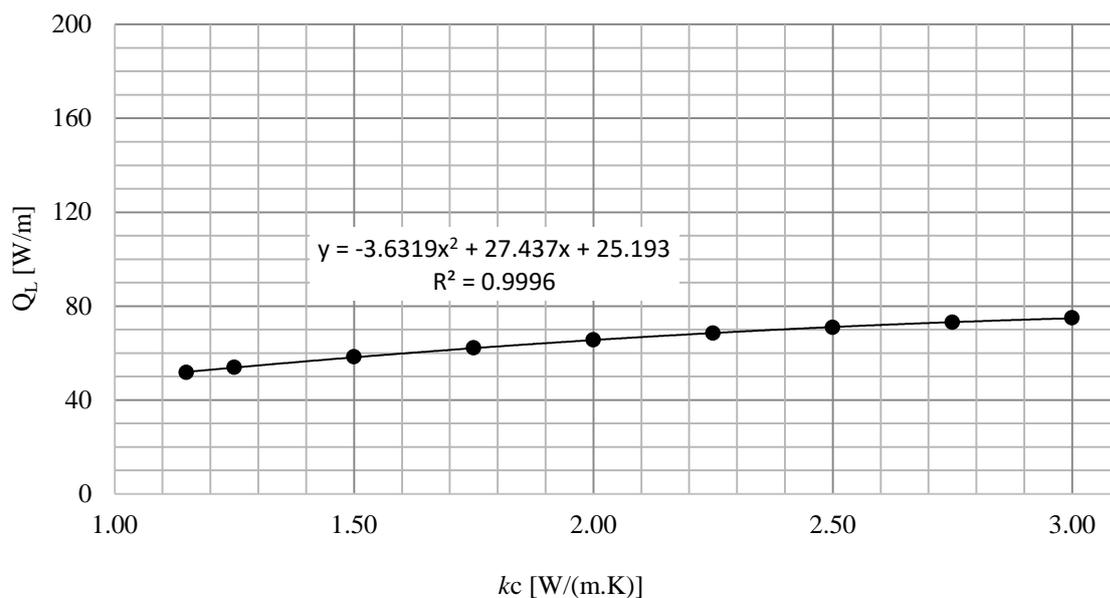


Figura 5.29 - Taxas de troca de calor considerando diferentes valores de condutividade térmica do concreto (estaca).

### 5.3.3.7. Condutividade térmica das camadas de solo

Dentro deste estudo se considera a variabilidade do fluxo devido a mudanças na condutividade térmica das camadas de solo ( $\Delta k_s$ ). Neste ponto, é importante destacar que a condutividade térmica do modelo padrão do ensaio TRT foi calculada por meio de formulações semi-empíricas (ver Item 3.6), onde também algumas delas indicam que a variabilidade deste parâmetro pode chegar a 20%. Em seguida, são mostrados na Tabela 5.26 os valores do parâmetro para cada camada de solo com as variações indicadas. A variação da condutividade térmica do solo é avaliada a cada 5% em um intervalo de -20% até 20% do valor padrão (no modelo TRT0) para cada camada ( $k_i$ ).

Tabela 5.26 - Condutividade térmica das camadas do solo considerando variações entre -20% e 20% do valor calculado.

Tipo de solo	$k_i$	$k_{-20\%}$	$k_{-15\%}$	$k_{-10\%}$	$k_{-5\%}$	$k_{+5\%}$	$k_{+10\%}$	$k_{+15\%}$	$k_{+20\%}$
	W/m.K								
Sedimentos	1.23	0.98	1.04	1.10	1.16	1.29	1.35	1.41	1.47
Seixos	1.74	1.39	1.48	1.57	1.65	1.83	1.91	2.00	2.09
Areia siltosa fina	1.94	1.55	1.65	1.74	1.84	2.03	2.13	2.23	2.32
Areia siltosa fina (sat)	2.14	1.71	1.82	1.93	2.03	2.25	2.35	2.46	2.57
Areia siltosa (sat)	1.26	1.01	1.07	1.13	1.20	1.32	1.39	1.45	1.51
Silte argiloso compactado	1.22	0.98	1.04	1.10	1.16	1.28	1.34	1.41	1.47

Os resultados indicam que a troca de calor é diretamente proporcional à variável térmica do solo. Na medida em que esta variável aumenta, o valor a troca de calor também aumenta, considerando assim o intervalo de atuação do fluxo de calor médio desde 61.7 W/m até 68.7 W/m. De acordo com os resultados, para variações inferiores aos valores determinados semi-empiricamente (-20%, -15%, -10% e -5%) se atinge uma taxa de troca de calor normalizada de 61.7 W/m, 62.8 W/m, 63.7 W/m e 64.7 W/m respectivamente. Seguindo com a anterior sequência com valores de  $k$  acima dos valores calculados inicialmente, ou seja, com 5%, 10%, 15% e 20% adicionais, se obtêm taxas de troca de calor de 66.4 W/m, 67.2 W/m, 67.9 W/m e 68.7 W/m respectivamente.

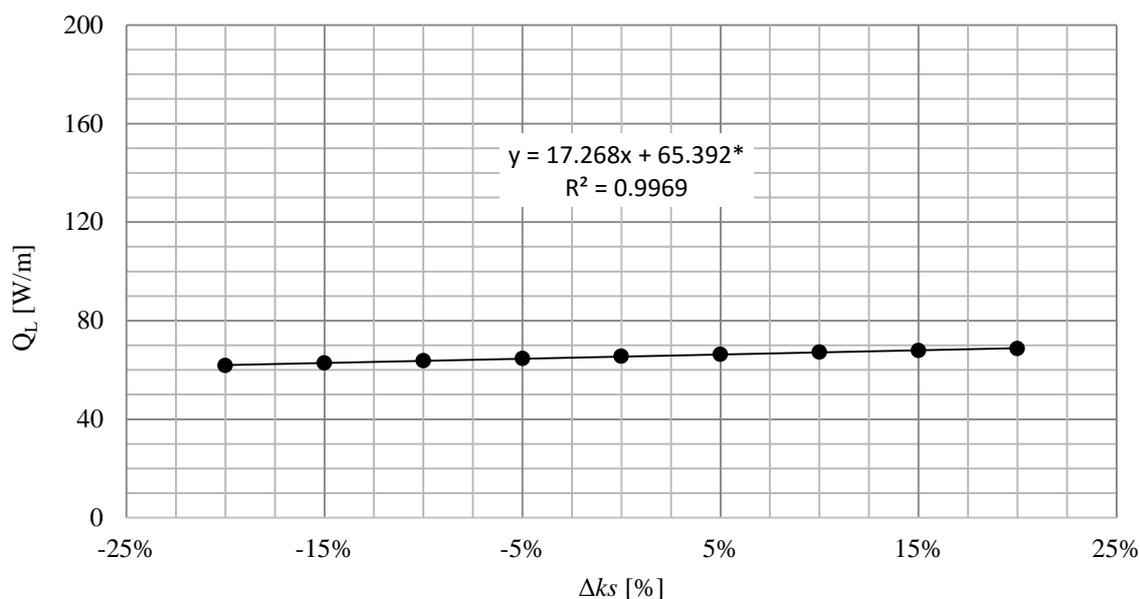
A variação é considerável ao comparar os resultados com os valores do modelo TRT padrão. Com os resultados anteriormente atingidos consegue-se identificar variações de -5.8%, -4.3%, -2.8%, 1.5%, 1.2%, 2.4%, 3.6% e 4.7% nas variantes de -20%, -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15% e 20% de  $k_i$  respectivamente. Além disto, é importante destacar que embora exista uma relação quase linear na evolução térmica, as variações conseguidas com a diminuição do parâmetro  $k$  não são iguais às conseguidas devido ao aumento do valor deste mesmo parâmetro.

Tabela 5.27 - Resultados da troca de calor considerando a variação de  $k$  nas camadas de solo.

Id	De [m]	Le [m]	$\Delta k_s$	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
							Q [W]	$Q_L$ [W/m]
ks-20	0.25	12	-20%	U	27.8	Turbulento	740.92	61.74
ks-15	0.25	12	-15%	U	27.8	Turbulento	753.18	62.77
ks-10	0.25	12	-10%	U	27.8	Turbulento	764.50	63.71
ks-05	0.25	12	-5%	U	27.8	Turbulento	775.35	64.61
TRT0	0.25	12	0%	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
ks+05	0.25	12	5%	U	27.8	Turbulento	796.57	66.38
ks+10	0.25	12	10%	U	27.8	Turbulento	805.99	67.17
ks+15	0.25	12	15%	U	27.8	Turbulento	815.19	67.93
ks+20	0.25	12	20%	U	27.8	Turbulento	823.78	68.65

De acordo com o típico anterior, ilustra-se na Figura 5.30 a evolução da eficiência térmica da estaca trocadora de calor. A evolução do fluxo de calor durante a troca térmica toma um comportamento linear proporcional à variação da condutividade térmica. Esta relação determina que para cada 5% de variação na condutividade térmica de cada camada de solo, se obtêm uma variação na taxa de troca de calor normalizada de aproximadamente 1.05 W/m.

Nesse sentido os resultados também concordam com a relação matemática do parâmetro de difusão, onde a relação entre esta e a condutividade térmica é diretamente proporcional. Portanto, ao se aumentar em cada modelo o valor da difusão dos materiais, logra-se atingir uma maior taxa da troca de calor média durante o ensaio.



*\*Interpolação linear considerando no eixo x valores em números p.e 5%=0.05*

Figura 5.30 - Taxa de troca de calor com a variação da condutividade térmica do solo.

### 5.3.3.8. Temperatura de entrada do fluido

A variação da temperatura do fluido na entrada da estaca (TE) é importante na hora de se projetar uma estaca de energia e escolher o sistema de bomba de calor indicado, que, ao mesmo tempo, depende das condições térmicas tanto do solo como do ambiente. Embora a temperatura média na entrada na estaca no modelo padrão (TRT0) foi de 38.9 °C são simuladas temperaturas de entradas de 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C e 90 °C. O principal objetivo da análise desta variável permite estudar os diferentes usos residenciais e industriais que particularmente este tipo de estaca poderia ter dentro do ambiente Brasileiro e particularmente para solos tropicais.

As respostas dos diferentes modelos de temperatura de entrada são mostradas na Figura 5.31. A evolução da temperatura para cada modelo apresenta uma resposta térmica na saída da estaca, que mostra durante as 48 horas de ensaio a tendência térmica da resposta a temperaturas particulares de equilíbrio energético. Para estes casos particulares onde não existe variação da temperatura na entrada do sistema, distinguir esse ponto de equilíbrio energético entre a temperatura do fluido e do sistema de estaca é ainda mais complicado. Devido a isto, trabalhar com diferença de temperatura e a evolução dela ao longo do tempo dá um índice da aproximação do equilíbrio térmico.

Um aspecto importante para se destacar é o acréscimo da diferença da temperatura entre entrada e saída da estaca na medida em que se aumenta a temperatura na entrada do sistema. Devido ao fato de que a temperatura do solo fica constante em cada modelo, ao se aumentar a variável de temperatura induzida o sistema melhora a capacidade de transferir ou extrair energia térmica do solo.

De acordo com os resultados térmicos apresentados anteriormente obtém-se os valores de taxa de calor total e normalizada por comprimento de estaca, apresentados na Tabela 5.28. Com o parâmetro consegue-se atingir valores de fluxo de calor com maiores gradientes. Isto significa que a variação da temperatura na entrada da estaca pode mudar representativamente os resultados de troca de calor desde 23 W/m até 272 W/m aproximadamente. Para temperaturas médias de entrada de 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C e 90 °C se obtiveram resultados do fluxo de calor de 23.6 W/m, 64.0 W/m, 105.3 W/m, 146.4 W/m, 188.2 W/m, 229.6 W/m e 271.9 W/m respectivamente.

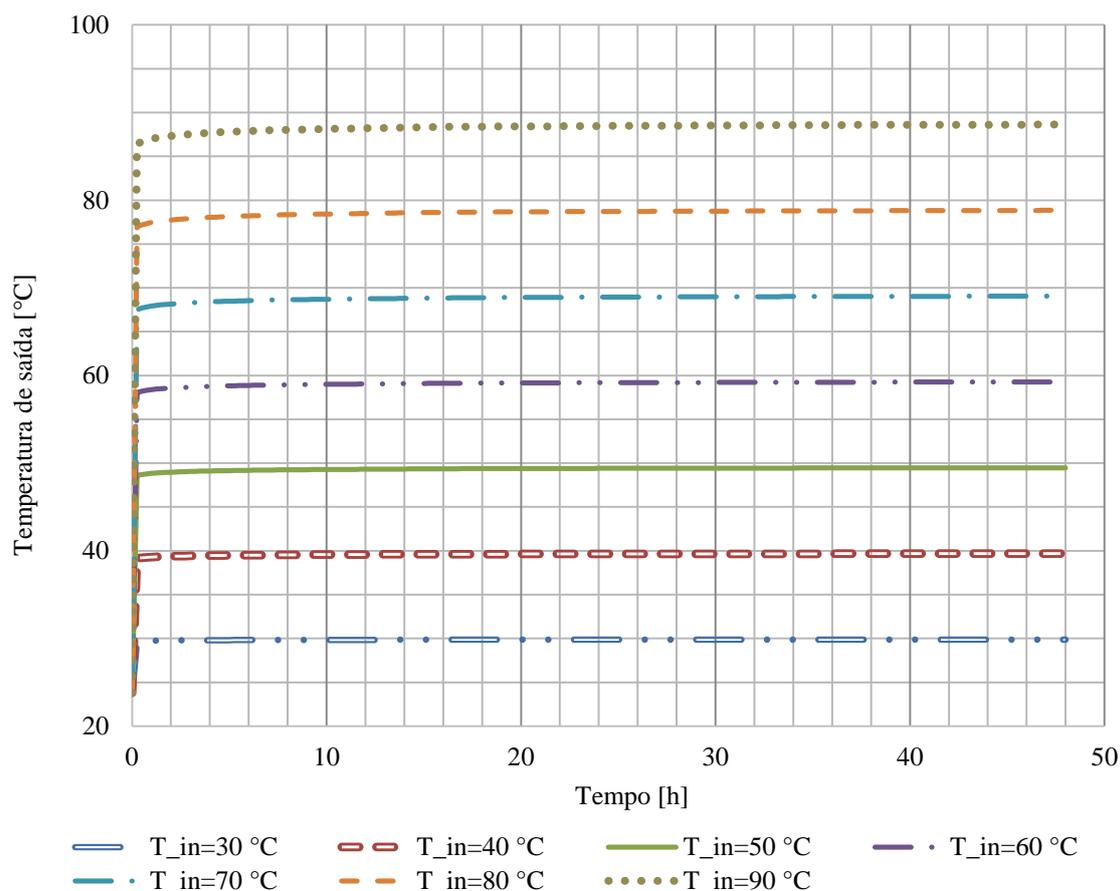


Figura 5.31 - Evolução da temperatura de saída considerando a temperatura média de entrada na estaca.

Tabela 5.28 - Resultados da troca de calor com a variação da temperatura de entrada.

Id	D <sub>e</sub> [m]	L <sub>e</sub> [m]	TE [°C]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
							Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
TE30	0.25	12	30	U	27.8	Turbulento	283.68	23.64
TRT0	0.25	12	38.9	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
TE40	0.25	12	40	U	27.8	Turbulento	768.80	64.07
TE50	0.25	12	50	U	27.8	Turbulento	1263.94	105.33
TE60	0.25	12	60	U	27.8	Turbulento	1756.70	146.39
TE70	0.25	12	70	U	27.8	Turbulento	2258.20	188.18
TE80	0.25	12	80	U	27.8	Turbulento	2755.11	229.59
TE90	0.25	12	90	U	27.8	Turbulento	3262.55	271.88

A seguir, estes resultados são ilustrados na Figura 5.32 como resumo da avaliação do fluxo de calor com a mudança da temperatura média na entrada da estaca. A evolução dos resultados de fluxo de calor mostra que ao se mudar a temperatura forma-se uma trajetória linear proporcional ao aumento da temperatura de entrada. Esta relação determina que por cada 10 °C aumentado na temperatura de entrada se proporcione um aumento da taxa de troca de calor de 41.4 W/m.

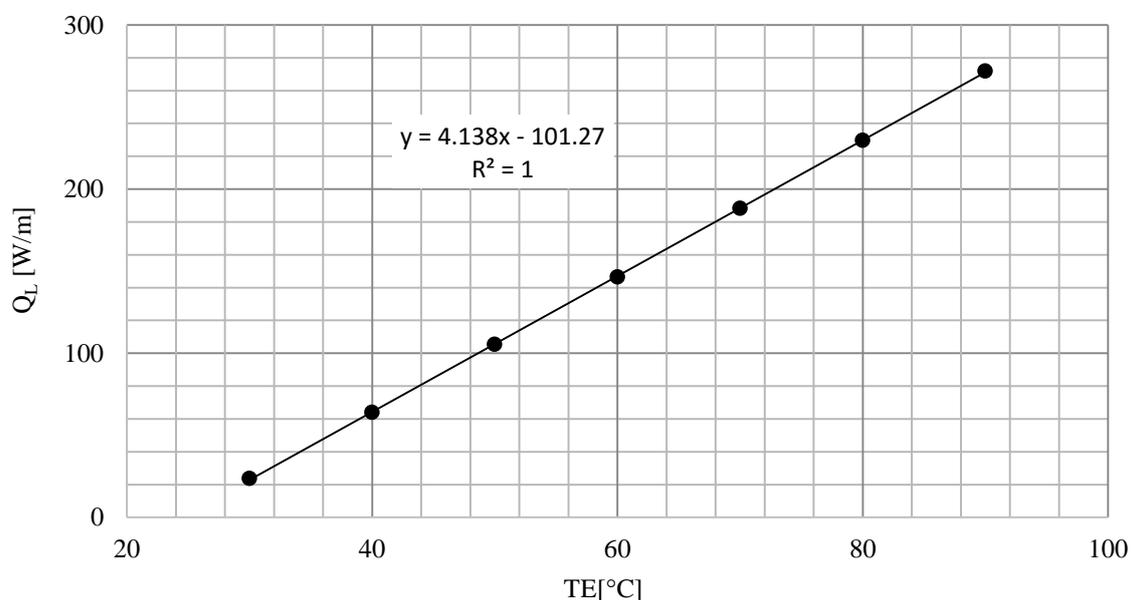


Figura 5.32 - Taxas de troca de calor considerando diferentes temperaturas na entrada da estaca.

### 5.3.3.9. Espessura da tubulação

Finalmente se realizou a análise da espessura da tubulação. Se variaram as espessuras obtendo-se oito modelos no total, com espessuras de 2 mm até 10 mm que forneceram informação sobre a evolução do fluxo de calor devido à variação da espessura na parede da tubulação. No modelo padrão a espessura da tubulação foi de 3 mm, que se variaram a 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 milímetros respectivamente.

Normalmente com o aumento da espessura da tubulação a troca de calor tende a cair devido ao fato de que a resistência térmica (que se opõe ao passo do calor) cada vez mais. Neste mesmo sentido, os resultados das diferentes simulações fornecem informação similar, onde o fluxo de calor variou desde 68.9 W/m a 50.5 W/m. Mesmo assim, para espessuras de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 milímetros as taxas de troca de calor médio por comprimento de estacas correspondem a 65.6 W/m, 63.2 W/m, 60.8 W/m, 56.5 W/m 54.6 W/m e finalmente 53.0 W/m aproximadamente.

Estes resultados implicam na diferença no fluxo de calor trocado entre cada modelo e o modelo padrão (com tubulação de 3 mm de espessura). A informação indica que para modelos com tubulação de espessura 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 milímetros a diferença seria de 5.0%, -3.6%, -7.2%, -13.9%, -19.1%, -21.4% e 23.0% respectivamente.

Tabela 5.29 - Resultados da troca de calor com a variação da espessura da tubulação.

Id	D <sub>e</sub> [m]	L <sub>c</sub> [m]	ET [mm]	Tubulação	Vazão média [l/min]	Regime do fluxo	Resultados	
							Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]
ET2	0.25	12	2	U	27.8	Turbulento	826.25	68.85
TRT0	0.25	12	3	U	27.8	Turbulento	786.81	65.57
ET4	0.25	12	4	U	27.8	Turbulento	758.21	63.18
ET5	0.25	12	5	U	27.8	Turbulento	730.09	60.84
ET6	0.25	12	6	U	27.8	Turbulento	677.44	56.45
ET7	0.25	12	7	U	27.8	Turbulento	655.43	54.62
ET8	0.25	12	8	U	27.8	Turbulento	636.21	53.02
ET9	0.25	12	9	U	27.8	Turbulento	618.05	51.50
ET10	0.25	12	10	U	27.8	Turbulento	606.10	50.51

Os valores de fluxo de calor apresentados anteriormente se resumem de igual forma na Figura 5.33, onde se analisa a evolução do comportamento térmico levando em conta a variação da espessura da parede da tubulação. A trajetória indica um comportamento não

linear que se ajusta ao arranjo polinomial de segunda ordem, tal como se ilustra no gráfico de fluxo de calor vs espessura da tubulação (ET).

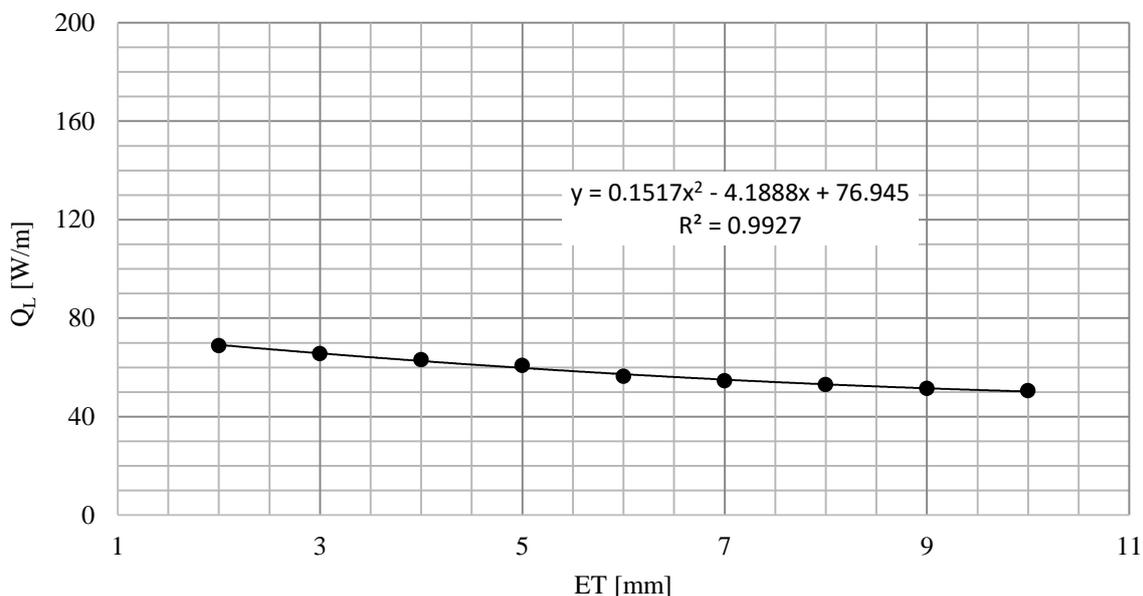


Figura 5.33 - Taxas de troca de calor considerando as diferentes espessuras na tubulação

#### 5.3.3.10. Análise do espaçamento entre estacas

A determinação do espaçamento entre estacas trocadoras de calor na abordagem térmica permite analisar o funcionamento das estacas envolvidas em um grupo de estacas de fundação, ou simplesmente em estacas trocadoras de calor com as mesmas características. A análise da eficiência e rendimento térmico de cada estaca com relação às outras fornece informação na hora de projetar uma obra com sistemas térmicos, como são as estacas de energia.

Desta forma, são determinadas as taxas de calor fornecidas em cada modelo de espaçamento de estacas. Ao se avaliar esta variável é possível comparar a eficiência padrão do modelo TRT com o resultado de uma estaca do modelo. A separação ( $S$ ) entre estacas marca uma diferença no fluxo de troca de calor que determina o espaço ótimo entre estacas cada vez que os valores de taxa de troca de calor tendam para um valor constante na medida em que aumenta esse espaço. Consideram-se as mesmas condições e propriedades térmicas e hidráulicas para cada sistema de estaca adequadas experimentalmente no caso TRT-1.

Ao se obter os resultados, observa-se que no modelo de estacas separadas 20 cm se forma uma região térmica que engloba as estacas que formam o conjunto trocador de calor. A Figura 5.34 ilustra a temperatura do solo e estacas junto com as linhas isotérmicas do modelo

após 48 horas de ensaio TRT. A formação da região afetada termicamente pelo ensaio se determina com a formação de diferentes linhas isotérmicas, em forma de bulbo, ao redor da dupla de estacas. Isto indica a possível relação do funcionamento de um sistema de "estaca equivalente" com o grupo de duas estacas de energia.

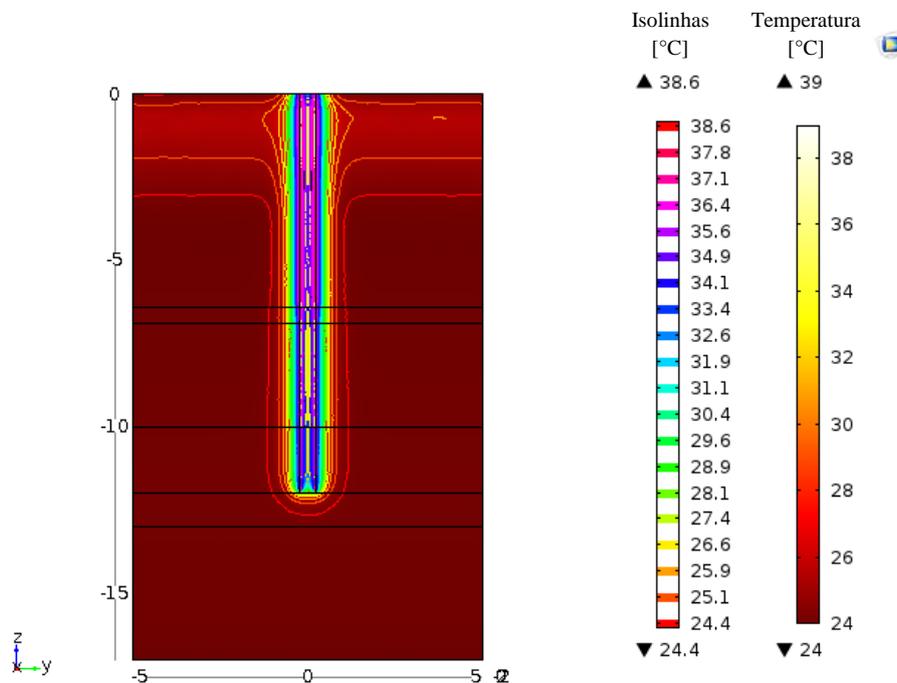


Figura 5.34 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com  $S=0.20$  m

Por outro lado, se identifica que no modelo de estacas separadas 80 cm essa região começa a ser dividida em duas regiões distintas termicamente, fazendo que cada estaca tenha nesse trecho livre um espaço de transição para as condições térmicas iniciais do solo. A Figura 5.35 ilustra a formação destas regiões onde se começa ter linhas isotérmicas entre as estacas após 48 horas de ensaio. Isto denota a formação de dois bulbos térmicos, que se separam a partir das estacas trocadoras de calor.

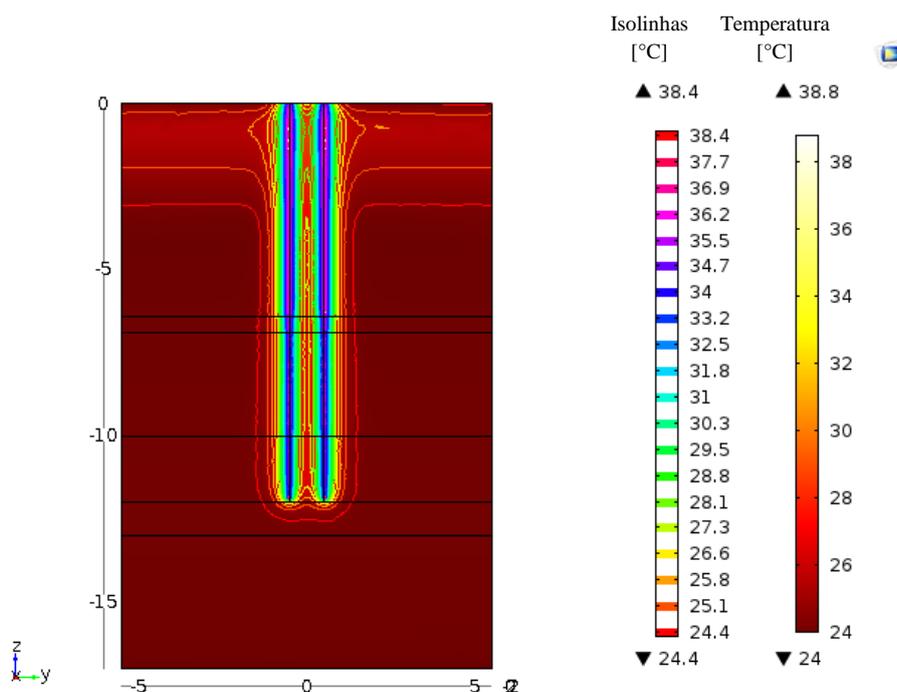


Figura 5.35 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com  $S=0.80$  m

No último modelo correspondente à Figura 5.36, existe uma separação de 2 m entre as estacas, e se consegue notar a total separação térmica regiões de solo entre estas, o que leva a concluir que existe uma individualidade na eficiência de cada uma delas. Este isolamento térmico permite o desenvolvimento de um maior trabalho térmico independente em cada sistema de estaca, visto que não se teria a interferência térmica ou interação mútua ao longo das estacas para as 48 horas de ensaio aqui simuladas.

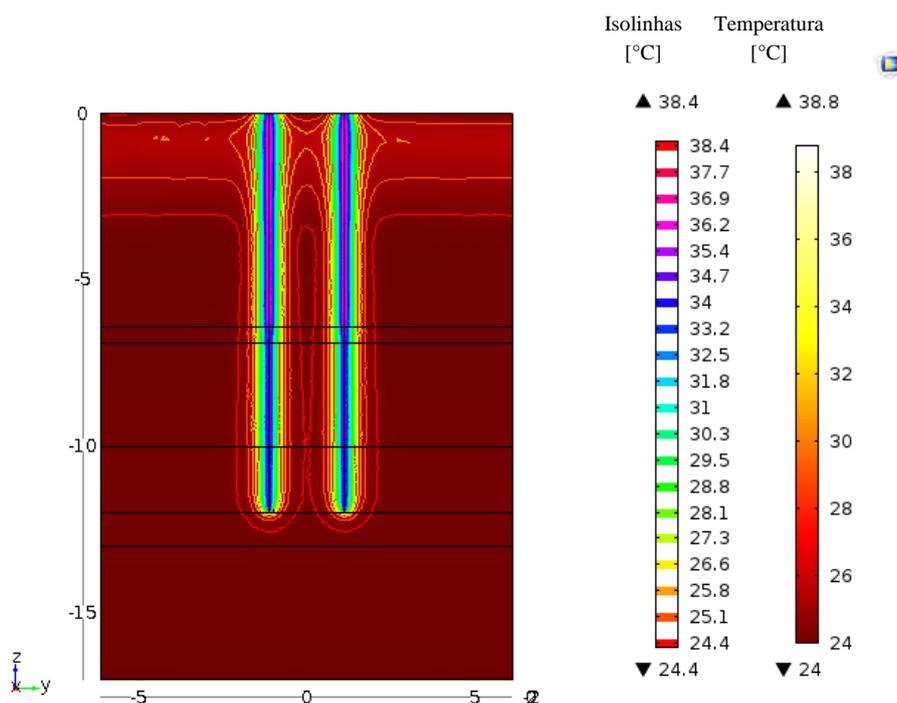


Figura 5.36 - Temperatura resultante após 48 h de ensaio TRT em dois estacas com  $S=2.00$  m

Na Tabela 5.30 mostram-se os resultados da taxa de troca de calor conseguidos nos diferentes modelos de estacas separadas por um espaço (S) que varia entre 0 a 2 metros. Mostra-se que na medida em que as estacas ficam juntas o valor do fluxo de calor é cada vez menor, chegando ao caso de gerar uma configuração de estacas com zonas de influência térmica completamente juntas. A taxa de troca de calor varia entre 54.4 W/m e 64 W/m, valor em que finalmente existe uma tendência de estabilização no comportamento térmico da estaca, sem importar o espaço existente entre as mesmas.

Tabela 5.30 - Resultados da troca de calor entre duas estacas separadas.

Espaçamento (S) [m]	Resultados		% Variação com TRT0*
	Q [W]	Q <sub>L</sub> [W/m]	
0.0	652.96	54.41	-17.01
0.2	723.60	60.30	-8.03
0.4	753.03	62.75	-4.29
0.6	764.03	63.67	-2.90
0.8	767.77	63.98	-2.42
1.0	768.75	64.06	-2.30
1.2	768.67	64.06	-2.31
1.4	769.47	64.12	-2.20
1.6	769.54	64.13	-2.20
1.8	769.15	64.10	-2.25
2.0	769.38	64.12	-2.22

\*TRT0 tem uma taxa de troca de calor  $Q=735.81$  W ou  $Q_L=65.67$  W/m

O resultado da evolução do fluxo de calor com o espaço entre as duas estacas trocadoras de calor se ilustra na Figura 5.37, onde os resultados da tabela anteriormente apresentada são mostrados. Neste caso se confere a tendência energética do conjunto de estaca para 64 W/m cada vez que o espaçamento entre elas aumenta. Observa-se também que as estacas não conseguem a mesma eficiência térmica que se obteve no ensaio padrão (TRT0), com espaçamentos de até 2 m entre elas, visto que existe ainda contato de linhas isotérmicas entre os sistemas de estacas em profundidade.

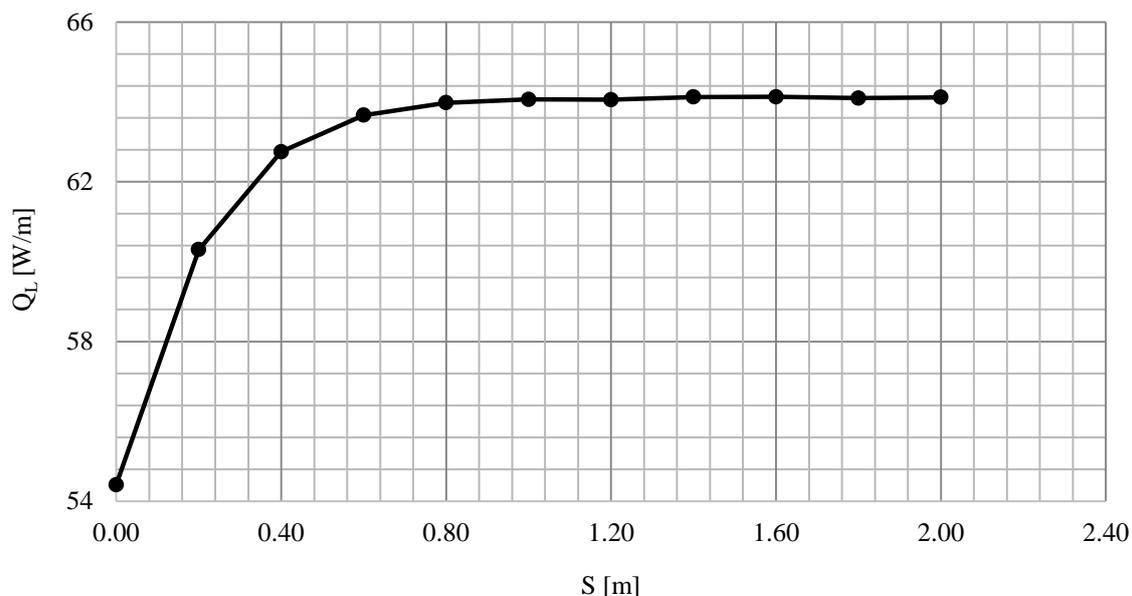


Figura 5.37 - Avaliação da troca de calor em uma das estacas em diferentes espaçamentos

#### 5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com os resultados da variação de parâmetros geométricos, hidráulicos, térmicos e de configuração no modelo padrão se conseguiu um conjunto de possíveis variações para qualquer teste de resposta térmica ligada aos valores de parâmetros originais do teste. Lembrando as condições e os valores dos resultados do modelo TRT0, se tem que o teste consistiu em uma estaca de concreto com  $kc=2$  W/m.K de 12 m de comprimento e 0.25 cm de diâmetro que leva incorporada uma tubulação tipo U de 2.50 cm de diâmetro e 3 mm de espessura. Os valores médios determinados para a condutividade e capacidade térmica específica do solo são encontrados na Tabela 4.10 (Pag.71).

Com base nisto se mostra a Tabela 5.31 com os valores máximos/mínimos e as variações obtidas durante a simulação de todos os modelos paralelos ao modelo padrão TRT0. Mostram-se os diferentes parâmetros que se envolvem na análise paramétrica e os resultados de variação do Fluxo de calor total e da eficiência ou taxa de troca do sistema por comprimento de estaca.

Tabela 5.31 - Resultados da troca de calor considerando a variação da espessura da tubulação.

Parâmetro	Unidades	Valores TRT0	Q [W]			Q <sub>L</sub> [W/m]		
			Máx	Mín	Dif.	Máx	Mín	Dif.
Le	m	12	1854	374	1480	66	61	5
De	m	0.25	1036	787	249	86	66	21
NT	-	1	1841	787	1054	153	66	88
VzU	l/min	27.8	787	490	297	66	41	25
Vz2U	l/min	-	1671	725	945	139	60	79
Vz3U	l/min	-	1841	854	988	153	71	82
N.A	m	10	795	782	13	66	65	1
kc	W/m.K	2	900	621	279	75	52	23
Δks	W/m.K	Tabela 4.10	824	741	83	69	62	7
TE	°C	38.9	3263	284	2979	272	24	248
ET	mm	3	826	606	220	69	51	18

Onde  $L_e$  e  $D_e$  são o diâmetro e comprimento da estaca; NT o número de tubos; VzU, Vz2U e Vz3U são as vazões sistemas de tubulação com 1, 2 e 3 tubulações em uma mesma estaca; NA posição do nível de água freática; kc a condutividade térmica do concreto; ks a condutividade térmica do solo; TE temperatura média de entrada na estaca e ET espessura da parede da tubulação.

A informação desta tabela indica que os intervalos de atuação do fluxo de calor médio devido ao comprimento (de 6m a 35 m de profundidade) varia em 4.6 W/m, devido à mudança do diâmetro (de 0.25 m a 1.05 m) de 20.8 W/m, do tipo de concreto de 23.3 W/m, por número de tubulações (até 3 tubulações) de 87.9 W/m, por mudanças na vazão em configurações U de 24.7 W/m, 2U de 78.8 W/m e 3U de 82.3 W/m, por variação da posição do nível da água freática (entre 7 m e 12 m de profundidade) de 1.1 W/m, devido à condutividade térmica nas camadas de solo (entre -20% e 20% de variação) de 6.9 W/m, devido à temperatura média na entrada da estaca de 248.2 W/m e finalmente, por causa da espessura da tubulação uma variação máxima de 18.4 W/m.

Nota-se na Figura 5.38 que a variável de maior impacto no resultado da taxa de troca de calor total é a temperatura média de entrada (TE). O comprimento (Le), o número de tubulações NT e a vazão do fluido (Vz) são, sem dúvida, variáveis que impactam de maneira significativa na mudança do fluxo de calor total. Embora isto aconteça para o fluxo de calor total, quando se normalizam os valores totais pelo comprimento (ver Figura 5.39), a eficiência da estaca muda, sendo assim, o comprimento é uma das variáveis que não influencia muito na eficiência térmica da estaca, pelo menos nesta condição particular de análise. Nesse sentido,

para o presente caso notou-se que as variáveis geométricas de comprimento e diâmetro da estaca não contribuem em maior impacto na eficiência da estaca de energia.

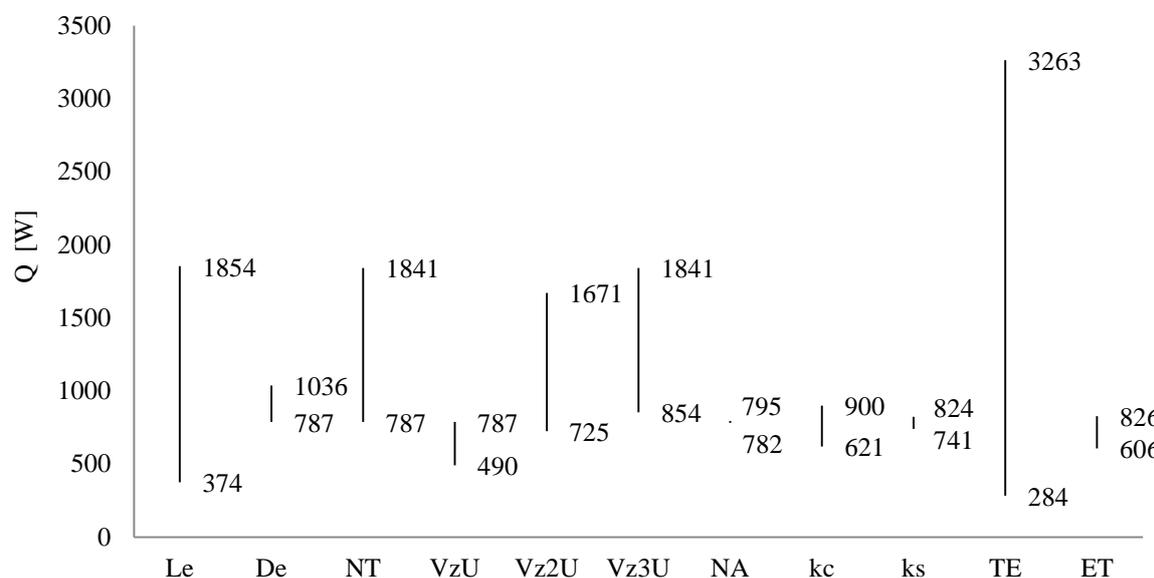


Figura 5.38 - Intervalos de variação da taxa de troca de calor total (Q).

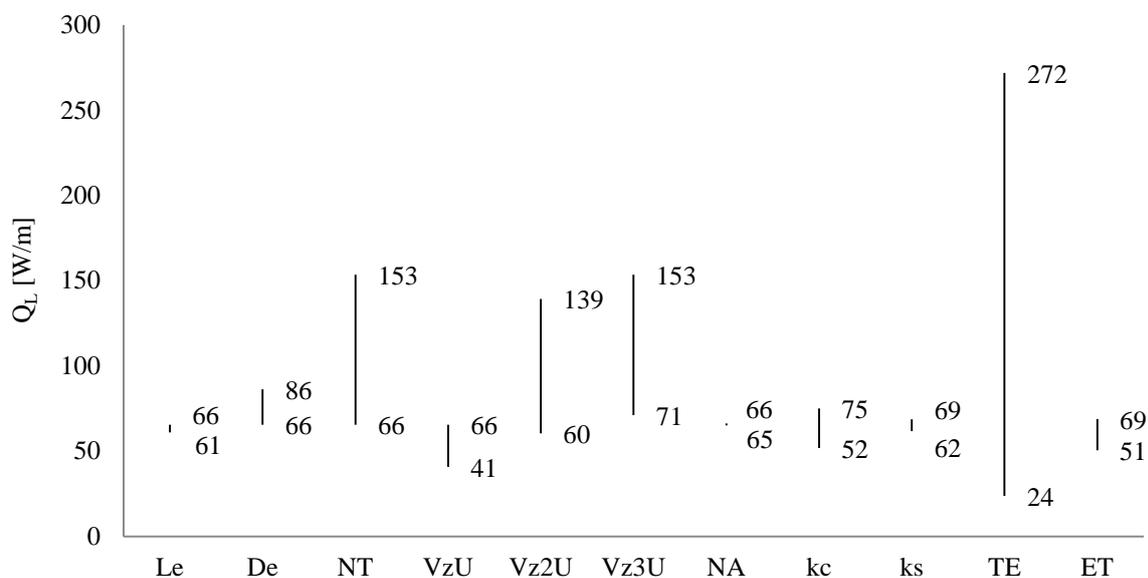
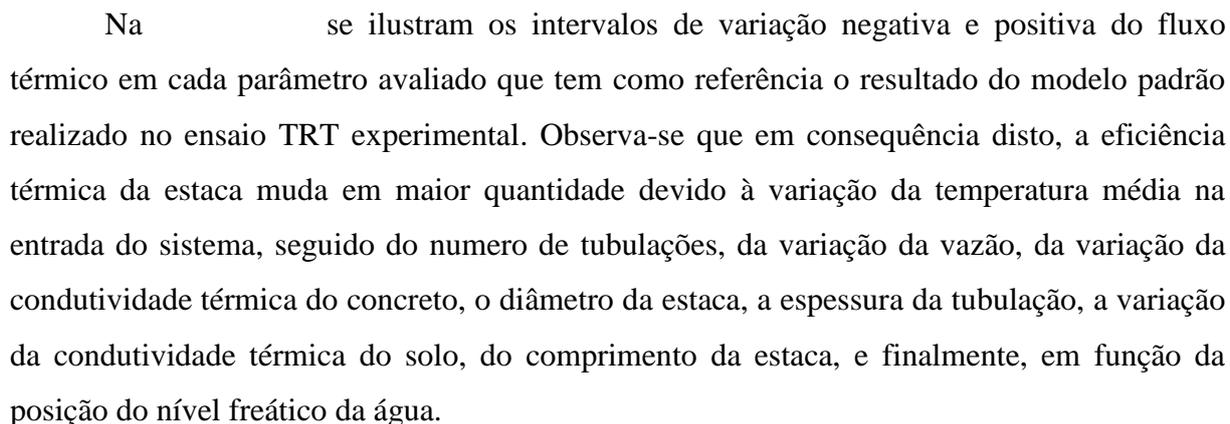


Figura 5.39 - Intervalos de variação da taxa de troca de calor normalizada ( $Q_L$ ).

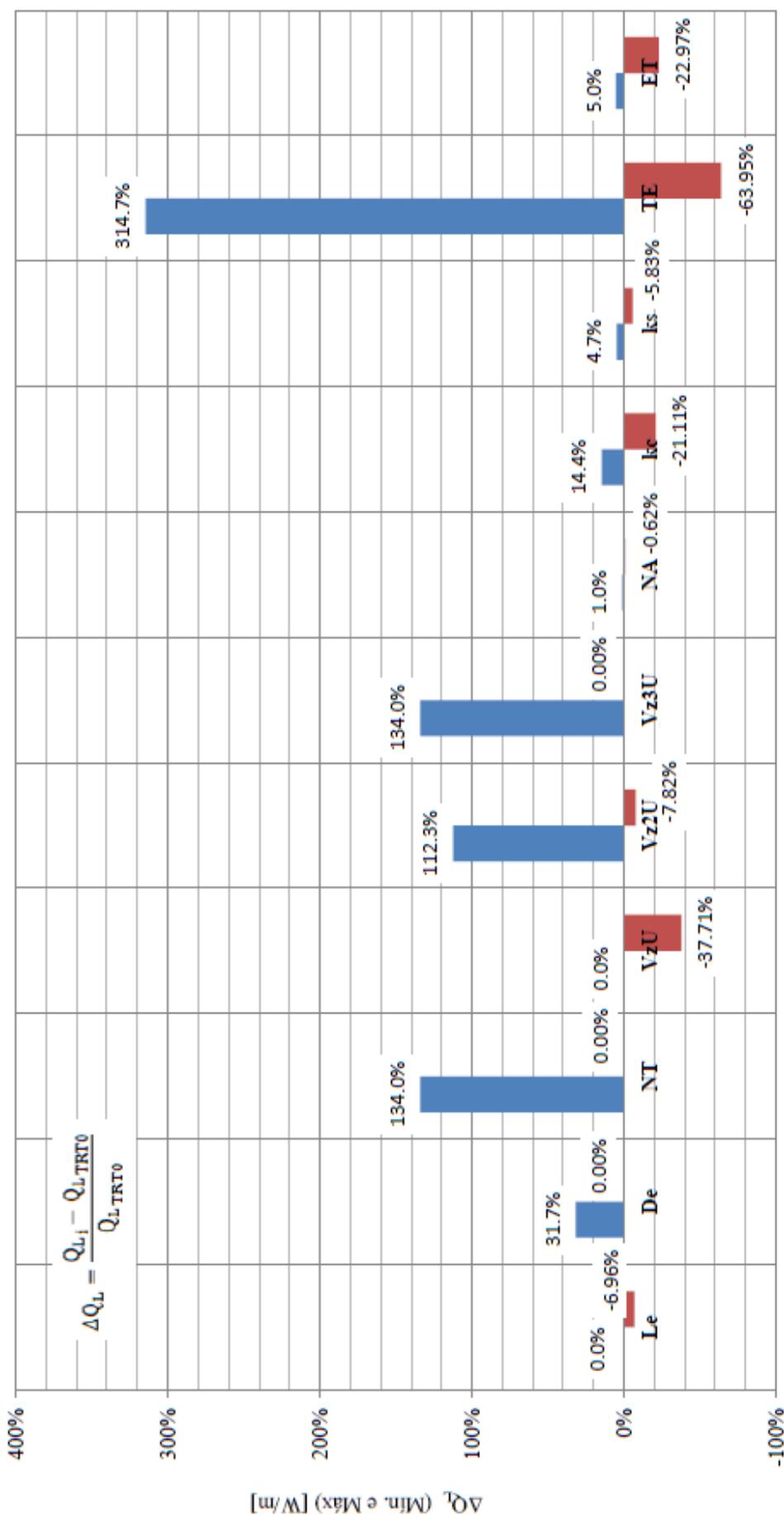
Onde  $L_e$  e  $D_e$  são o diâmetro e comprimento da estaca; NT o número de tubos; VzU, Vz2U e Vz3U são as vazões sistemas de tubulação com 1, 2 e 3 tubulações em uma mesma estaca; NA posição do nível de água freática;  $k_c$  a condutividade térmica do concreto;  $k_s$  a condutividade térmica do solo; TE temperatura média de entrada na estaca e ET espessura da parede da tubulação.

Na  se ilustram os intervalos de variação negativa e positiva do fluxo térmico em cada parâmetro avaliado que tem como referência o resultado do modelo padrão realizado no ensaio TRT experimental. Observa-se que em consequência disto, a eficiência térmica da estaca muda em maior quantidade devido à variação da temperatura média na entrada do sistema, seguido do número de tubulações, da variação da vazão, da variação da condutividade térmica do concreto, o diâmetro da estaca, a espessura da tubulação, a variação da condutividade térmica do solo, do comprimento da estaca, e finalmente, em função da posição do nível freático da água.

Assim, com base na anterior análise, que para se ter a melhora da eficiência térmica de uma estaca de energia isolada deve-se ter uma configuração de estaca de diâmetro de 12 m de comprimento e diâmetro cerca de 1 m de diâmetro com 3 tubulações tipo U de 2 mm de espessura incorporadas ao longo do comprimento da estaca (distribuídas entre espaços e coberturas iguais), que consiga transportar fluido de altas temperaturas (e inferior ao permitido pelas normas) a uma vazão de 27.8 l/min.; O concreto de condutividade térmica de 3 W/m.K deve ser fabricado sobre o solo com a maior condutividade térmica possível para cada camada de solo e com nível de água freática que corresponda a pelo menos 7 m de profundidade. No caso de ter duas estacas contínuas, o espaçamento mínimo entre elas seria de aproximadamente 1 m.

Resultado do potencial térmico do sistema da estaca é comparado com pesquisas de outros autores que realizaram modelos paramétricos de estacas trocadoras de calor:

Bidarmaghz et al (2013) mostra que a resposta para uma estaca de 0.14 cm de diâmetro e 30 de comprimento em 120 horas de ensaio obtêm valores entre 12 W/m e 48 W/m aproximadamente em estacas com configuração de tubulação U simples com vazões simuladas entre 0 l/min. e 15 l/min. Para configuração com duas tubulações U (2U), o intervalo de atuação do fluxo de calor se encontra entre 24 e 72 W/m aproximadamente para essa mesma estaca nas mesmas condições hidráulicas. Os mesmos autores mostram que aquela estaca, simulada com configurações U simples, duplo U e triplo U com fluxo turbulento de 14.5 l/min., tem um intervalo de atuação da taxa de troca de calor que varia entre 33 W/m e 50 W/min. Para este caso, a estaca simulada em São Carlos teria um intervalo entre 64 W/m e 95 W/m com as mesmas características de fluxo.



Onde *Le* e *De* são diâmetro e comprimento da estaca; *NT* o número de tubos; *VzU*, *Vz2U* e *Vz3U* são as vazões nos sistemas de tubulação com 1, 2 e 3 tubulações; *NA* posição do nível de água freática; *ke* a condutividade térmica do concreto; *ks* a condutividade térmica do solo; *TE* temperatura média de entrada na estaca e *ET* espessura da parede da tubulação.

Figura 5.40 - Intervalos de variação do fluxo de calor com relação ao modelo padrão TRT0

## 5.5. CONCLUSÕES PARCIAIS DA ANALISE NUMÉRICA

### 5.5.1. Estudo de sensibilidade e calibração numérica do TRT

- Ao se realizar a análise de sensibilidade da geometria e dimensões do domínio de solo, se pode inferir que para este caso particular os resultados de resposta térmica não variam em grande medida, o que significa que o modelo não é altamente sensível a estas variações;
- O elemento hexaédrico pode se obter resultados em menor tempo de processamento que os elementos prismáticos e tetraédricos, embora o resultado seja aparentemente próximo, e aceitável. Logo utilizar elementos tetraédricos outorga melhor eficiência na obtenção de resultados (elementos processados/segundos) em um tempo próximo aos analisados com outros elementos e com maior numero de elementos analisados;
- A densidade da malha afeta o tempo de processamento sendo maior com uma malha cada vez mais densa, porém não afeta de forma considerável o resultado numérico já que os valores de taxa de troca de calor se situam entre 98 W/m e 100 W/m;
- A taxa de troca de calor é uma variável influenciada por parâmetros hidráulicos, térmicos e mecânicos, porém o valor da troca de calor é altamente sensível a diferença de temperatura conseguida nos diferentes resultados durante a calibração;
- Os resultados numéricos tiveram um resultado bem próximo ao resultado experimental. O estudo de sensibilidade dos elementos finitos, os valores iniciais e de contorno, e a obtenção de parâmetros térmicos do solo relativamente acertados, determinaram resultados numéricos aceitáveis com erros relativos menores a 1% em cada período de tempo;
- O aumento da região de interação térmica se relaciona com maiores taxas de troca de calor, que depende dos valores do gradiente térmico entre o solo e o fluido circulante, propriedades térmicas e vazão do fluído;

### 5.5.2. Estudo paramétrico do ensaio TRT

Consegue-se efetivamente determinar pela modelagem numérica o sentido do fluxo de calor para uma estaca de energia. Essa orientação do fluxo depende do gradiente térmico que existe entre a temperatura do fluido circundante e a temperatura do solo.

De acordo com os resultados, para se melhorar a eficiência térmica otimizada no ensaio TRT em uma estaca trocadora de calor, devem-se levar em conta as seguintes sugestões e considerações de configuração nos elementos que interatuam no ensaio:

- Utilizar concretos de alta densidade: isto favorece em grande parte no comportamento mecânico das estacas, mas, além disso, o concreto de alta densidade gera a vantagem de transmitir com maior eficácia o calor entre a estaca e o solo ou vice-versa;
- Melhorias no solo para conseguir um aumento da taxa de troca de calor: aumentar as propriedades térmicas, como a condutividade, por exemplo. Estes tratamentos podem ser muito custosos devido aos processos e ferramentas utilizadas para este tipo trabalho logo. Deve ser realizado um balanço entre o custo e o benefício, como a forma de se avaliar a viabilidade de projeto neste ponto;
- Aumentar o número de tubulações na estaca de energia: isto dará uma resposta térmica ainda maior embora este parâmetro de avaliação se encontre limitado pelo espaço da seção da estaca. Para este caso em particular, dois circuitos de tubulações tipo U dão uma eficiência relativamente boa em comparação ao sistema de uma tubulação, e em questões de viabilidade econômica, determinado fluxo de calor em sistemas de 3 tubulações podem ser obtido em um sistema de 2 tubulações só se mudando a vazão do fluido para se obter o mesmo fluxo de calor;
- Aumentar o gradiente de temperatura: uma maior diferença entre a temperatura da água e o solo fornece ao sistema um melhor rendimento e, portanto uma maior eficiência por comprimento de estaca. Porém dependendo da temperatura final do sistema e do projeto, a bomba de calor a utilizar pode diminuir o valor do COP (Coeficiente de trabalho) sendo assim o sistema de estaca, para este caso, menos eficiente e não prático para o objetivo de projeto. Se precisa ter sempre uma maior contribuição energética do solo que da bomba para viabilizar o sistema;
- Aumentar a velocidade do fluxo de água no sistema: foi observado que ao aumentar a velocidade do fluxo nas tubulações do sistema aumenta de maneira considerável a taxa de troca de calor, e, portanto, a eficiência térmica da estaca por comprimento. Dentro dos modelos avaliados, o fluxo completamente turbulento de 27.8 l/min fornece os melhores resultados. Em estacas com uma tubulação, deve-se determinar o fluxo que gere uma troca de calor constante com o regime do fluxo, que para este caso seria de aproximadamente 9.4 l/min. Porém aumentar a velocidade do fluido circundante pode aumentar a energia consumida pela bomba de calor e aumentar os custos energéticos;
- Diminuir a espessura da tubulação: colocar tubulações com parede delgada de 2 mm de espessura diminui a reatividade térmica entre o fluxo e o concreto. Portanto, também se devem avaliar os materiais e as temperaturas máximas para estes sistemas

com tubulações de paredes delgadas para evitar rupturas das mesmas. Deve-se levar em conta que em paredes muito finas se facilita o rompimento da tubulação e o aumento da perda de pressão. Colocar materiais mecanicamente resistentes que não permitam o aumento da perda de pressão (tubulação com rugosidade relativamente lisa) na tubulação pode ser uma solução a esta limitação;

- Aproveitamento dos sistemas de troca de calor em épocas do ano específicas com nível de água alto: para o caso estudado, a modificação do nível de água junto com o nível do terreno é impossível de controlar, mas realizar a troca de calor quando a posição da água freática (com alta gradiente de temperatura) se encontra abaixo do maior nível possível resulta perder eficiência térmica, perda que também é relativamente baixa de acordo aos valores obtidos nos modelos simulados.

---

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO

### 6.1. CONCLUSÕES

De forma geral a pesquisa atingiu os objetivos originalmente traçados. Primeiramente se realizou uma aproximação de parâmetros térmicos como a condutividade térmica  $k$  e a capacidade calorífica específica  $C_p$  de cada camada de solo que conforma o perfil de estudo, por meio da equação empírica de Kersten (1949) e equações semi-empíricas de Johansen (1975), Cotê e Konrad (2005) e Lu et al. (2007). Estes parâmetros, junto com informação fornecida do ensaio TRT experimental em um solo tropical típico se inseriram como parâmetros e variáveis de entrada no software COMSOL Multiphysics v5.2 para a posterior simulação do modelo numérico que representaria o ensaio realizado em campo, nas condições dadas. Depois de se obter os resultados numéricos, se analisaram os efeitos térmicos no solo circundante e se validaram os resultados comparando-se as temperaturas obtidas numérica e experimentalmente, obtendo-se assim, um erro de 0.3% na temperatura de resposta e 15% na taxa de troca de calor sobre o modelo real. Com essa avaliação, se procedeu a realizar o estudo de sensibilidade dos modelos finitos com a geometria, as dimensões, o tipo de elemento finito e a densidade da malha que representou o domínio de solo estudado. Se obteve de forma otimizada uma estrutura do domínio de solo conformada por uma geometria cilíndrica, com um raio de estudo de 3 m formado por elementos tetraédricos e com malha normal. Como fase posterior, se realizou uma análise paramétrica da troca de calor do ensaio TRT assim foi modelado. Foram analisados nesta etapa os efeitos térmicos da variação do comprimento e do diâmetro da estaca, do número de tubulações, da vazão dentro das tubulações, da condutividade térmica das camadas de solo e do concreto e finalmente da espessura da tubulação. Com este processo, se chegou as seguintes conclusões principais:

- Para este exemplo de ensaio TRT, não existiu numericamente uma maior variabilidade dos resultados da energia média trocada entre o solo e o fluido se os domínios estudados, tipo cilíndrico ou paralelepípedo (quando o raio do cilindro é igual ao lado da secção do paralelepípedo), já que não existe alta sensibilidade entre a geometria cilíndrica e paralelepípedo nos resultados térmicos, mas sim no tempo de processamento adotado para o problema.
- Não se apresentou uma maior variabilidade dos resultados térmicos quando foram variados os limites do domínio do solo, no caso estudado. Claramente isto depende

significativamente das propriedades térmicas deste material geotérmico, mas também dos materiais que interatuam no domínio;

- O problema de troca de calor em uma estaca de energia pode ser avaliado com qualquer tipo de elemento que o software permita se utilizar. Os resultados não variaram consideravelmente e não afetam cálculos posteriores como o fluxo de calor trocado.
- Em termos de densidade da malha, não existiu variação significativa nos resultados, ajustando-se o modelo a qualquer tipo de malha variável. Entretanto existe uma maior importância no refinamento da malha perto da estaca e na tubulação que a forma;
- As formulações semi-empíricas para se determinar propriedades térmicas como condutividade térmica e capacidade térmica específica, forneceram valores razoáveis sem levar em conta parte da condutividade térmica proporcionada pelos materiais oxidados do solo, porém, se obtiveram resultados numéricos muito próximos aos resultados experimentais com um erro de 15% na taxa de troca de calor;
- Considerando as características e propriedades do solo em estudo, se notou que com o aumento do comprimento da estaca se ajudou na obtenção de um incremento na quantidade total do fluxo de calor. Porém isto não representou uma maior eficiência do sistema, devido ao fato de que o incremento de energia trocada não foi representativo ao ser normalizado com o comprimento da estaca;
- Durante a análise do fluxo com o número de tubulações foi observado que a colocação de uma segunda tubulação não dobrou a efetividade térmica da estaca, e que para este caso em particular; uma terceira tubulação aumenta a variação para 7% a mais com relação ao sistema com tubulação dupla e 20% com relação ao sistema simples, concluindo-se assim que o fluxo de calor não se acrescenta de maneira linear e proporcional com o número de tubulações;
- Analisando as variáveis que mudam o resultado durante o ensaio TRT experimental, se concluiu que a vazão é um grande potencial de mudança, e que o nível freático de água e que propriedades como a variação da condutividade térmica dos materiais (em geral) não geram mudanças significativas no resultado de fluxo de calor final;

- A construção de estacas com diferentes materiais pode ser importante na hora de se projetar estacas trocadoras de calor, já que mudanças do fluxo de calor final estão relacionadas com concretos de alta densidade e com valores de condutividade térmica que melhoram a troca de calor;
- Os sistemas de estacas trocadoras de calor são potencialmente mais eficientes em matéria térmica quando existem diferenças de temperaturas (entre o fluido e o solo) cada vez maiores, e por este motivo, o sistema pode ser vantajoso para aplicações industriais em lugares que tenham circuitos de fluidos com temperaturas mais altas que a temperatura do solo, e que esta estaca faça parte de um sistema de esfriamento em lugares isolados;
- A obtenção de uma boa eficiência térmica da estaca de energia está relacionada às modificações impostas a variáveis geométricas e hidráulicas (fluxo, número de tubulações e espessura da tubulação), ou seja, soluções práticas que aumentam de maneira significativa a taxa de troca de calor total, tais como as facilidades de técnicas e construtivas que são fáceis de implementar para fins de projeto. Variáveis como a condutividade térmica dos materiais, que são difíceis de modificar, podem estar em segundo plano na ampliação do resultado térmico da estaca de energia.

## **6.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

- Realizar uma campanha de ensaios básicos e de caracterização do solo local para se determinar a informação real das propriedades térmicas de cada camada de solo que está envolva na pesquisa. Além disto, é importante realizar ensaios para se determinar a condutividade térmica e a capacidade calorífica específica dos solos realizando ensaios calorimétricos em laboratório de cada camada de solo. Por último, comparar os resultados obtidos com formulações semiempíricas e as obtidas diretamente de ensaios;
- Realizar simulações do ensaio TRT levando em conta o comportamento não saturado do solo a partir de curvas características inseridas num modelo numérico, Devem-se observar os resultados obtidos do fluxo de calor com relação à mudança da sucção no solo e se comparar resultados com dados experimentais e numéricos. Se for possível monitorar a cada temperatura em pontos ao longo da profundidade da estaca e do solo, para logo uma melhor calibração do modelo numérico.

- Realizar análises numéricas de sistemas integrados de grupos de fundação em diferentes distribuições, com base nos resultados preliminares e conclusões da presente pesquisa. Se for possível realizar modelos numéricos validados experimentalmente com ensaios TRT em solos tipos tropicais, onde pode ser utilizada a maioria destas fundações especiais.
- Realizar ensaios de condutividade térmica e capacidade calorífica dos concretos que fazem parte do estudo experimental. Realizar simulações com maior detalhe conferido as propriedade térmicas dos materiais para obter maior acurácia nas futuras simulações numéricas.

---

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Akrouch, G. A., Sanchez, M., & Briaud, J. L. (2014). Thermo mechanical behavior of energy piles in in high plasticity clays. *Acta Geotechnica*, 3, pp. 399-412. 9.
- Amis, T., & Loveridge, F. (2014). Energy piles and other thermal foundations for GSHP developments in UK practice and research. *REHVA Journal*, 32-35.
- Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R., Wang, B., & Ranjith, P. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131-138.
- Bertani, R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, (pp. 1-19). Melbourne, Australia.
- Bidarmaghz, A., Narcilio, G., & Johnston, I. (2013). Numerical Modeling of Ground Heat Exchangers with Different Ground Loop configuration for Direct Geothermal Applications. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 3343-3346). Paris: Presses des Ponts.
- Bortolucci, A. A. (1983). *Caracterização Geológico-Geotécnica da região urbana de São Carlos-SP, a partir de sondagens de simples reconhecimento*. São Carlos: EESC-USP.
- Bourne-Webb, P. (2015). Field testing of energy piles – an overview of experiences in Europe (& elsewhere). 1-18. Lisboa, Portugal.
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., & Soga, K. (2013). A framework for understanding energy pile behaviour. *ICE Publishing*, 166(2), 170–177.
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., & Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique*, 59(3), 237–248.
- Bourne-Webb, P., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., & Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique* 59(3), 237–248.
- Brandl, H. (1998). Energy piles for heating and cooling of buildings. *7th International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations*, (p. 6). Vienna, Austria.
- Brandl, H. (2006). Energy piles and other thermo-active Ground Source Systems. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- Brettmann, T., Amis, T., & Kapps, K. (2010). Thermal conductivity analysis of geothermal energy piles. *Proceeding of the 11th International Conference of Geotechnical Challenges in Urban Regeneration* (pp. 1-6). London, UK: DFI2010.

- 
- Canadian GeoExchange Coalition. (2012). *The State of the Canadian Geothermal Heat Pump Industry 2011 Industry Survey and Market Analysis* (Vol. 1). Montreal, Quebec: Canadian GeoExchange Coalition.
- Cardoso, R., Hamza, V., & Alfaro, C. (2010). Geothermal Resource Base for South America: A Continental Perspective. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, (pp. 1-6). Bali, Indonesia.
- Cecinato, F., & Loveridge, F. A. (2015). Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Elsevier*, 82, 1-13.
- CEPAGRI. (2015). *Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura*. Fonte: [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_549.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html)
- CGC. (2012). *The State of the Canadian Geothermal Heat Pump Industry 2011 Industry Survey and Market Analysis*. Montreal, Canada: Canadian GeoExchange Coalition.
- Cintra, J. C. (2006). Campos Experimentais Brasileiros. *XIII COBRAMSEG e III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, (pp. 21-27). Curitiba, Brasil.
- Côté, J., & Konrad, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443-458.
- Dupray, F., Laloui, L., & Kazangba, A. (2014). Numerical Analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation. *Elsevier*, 55, 67-77.
- E.H.N Gashti, K. K. (2014). Structural Behaviour of Concrete Energy Piles in Thermal Loadings. *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8(12), 1177-1181.
- EGSHPA. (2011). *European Ground Source Heat Pump Association*. Fonte: <http://egshpa.blog.com/geothermal-principle/>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2015). *Balanço Energético Nacional 2015*. Rio de Janeiro: EPE.
- EurObserv'ER. (2011). Ground-Source Heat Pump Barometer. *Systèmes Solaires, le journal des énergies renouvelables*, 205, 82-101.
- Eurostat. (2012). *Energy dependence*. Retrieved from <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy>
- Feuvre, P. L., & Cox, C. S. (2009). *Ground source heating and cooling pumps—state of play and future trends*. Bristol: Environment Agency.
- Forsén, M., & Bertenstam, P. R.-L. (2008). *Market status for ground source heat pumps in Europe*. Stockholm: Martin Forsén.
-

- 
- Gachti, E., & Malaska, K. K. (2014). Structural Behaviour of Concrete energy piles in Thermal Loadings. *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8(12), 1177-1181.
- Gao, J., Zhang, X., & Liu, J. (2008). Numerical and experimental assesment of thermal performance pf vertical energy piles: an application. *Applied Energy*, 85(10), 901-910.
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test: Methot Development and valuation*. Lulea, Suécia: Lulea University of Technology.
- German Agency for Technical Cooperation. (2002). *Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe: situación y propuestas de políticas*. Santiago: CEPAL (Estudios e Investigaciones).
- German Agency for Technical Cooperation. (2004). *Fuentes renovables de energía en america latina y el caribe*. Santiago de Chile, Latinoamerica: CEPAL.
- GSHPA. (2012). *Thermal Pile Design, Installation & Materials Standards* (Vol. 1). Knowl Hill, UK: Ground Source Heat Pump Association.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., & Ochifuji, K. (2007). Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and Buildings*, 39, 517-524.
- Hemmingway, P., & Long, M. (2011). Geothermal Training and Research. *Geothermal Energy-Progress and Research*, 43-46.
- Hemmingway, P., & Long, M. (2012). Design and development of a low-cost thermal response ring. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 165(3), 137-148.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. San Diego, California, USA: Abridged, illustrated.
- Hughes, P. J. (2008). *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption, and Actions to Overcome Barriers*. U.S. Department of Energy. Springfield: National Technical Information Service.
- ISO. (2007, 01 09). Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. *ISO TC 163/SC 2*. Geneva, Switzerland: ISO copyright office. Retrieved from [www.iso.org](http://www.iso.org)
- Jalaluddin, A., Miyara, A., Tsubaki, K., Inoue, S., & Yoshida, K. (2011). Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. *Renewable Energy*, 36, 764-771.
- Johansen, O. (1975). *Thermal conductivity of soils (Ph.D. dissertation)*. Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, 1977).
-

- 
- Kasumi Yasukawa, M. S. (2015). Country Update of Japan: Renewed Opportunities. *Proceedings World Geothermal Congress 2015* (pp. 1-6). Melbourne, Australia: Pangea Stanford University.
- Kersten, M. S. (1 de 06 de 1949). Thermal Properties of Soils. *Bulletin No. 28*, 52(21), 233.
- Korea Energy Management Corporation (KEMCO). (2015). *Korea Energy Agency*. Fonte: <http://www.kemco.or.kr/>
- Kwon, K., Lee, J., & Mok, J. (2012). Update of current status on ground source heat pumps in Korea (2008-2011). *Journal of*, 48, 193-199.
- Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763–781.
- Lind, L. (2011). GNS Science report 2010/54. In: *Swedish Ground Source Heat Pump Case Study (2010 Revision)* (p. 25). GNS Science.
- Loveridge, F. A., & Powrie, W. (2013). Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 166(2), 178-196.
- Lu, S., Ren, T., Gong, Y., & Horton, R. (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 8-14.
- Machado, S. L. (1998). *Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados*. São Carlos: EESC-USP.
- McCartney, & John, S. (2011). Engineering performance of energy foundations. *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, (p. 15). Toronto.
- McCartney, J. S., & Murphy, K. D. (2012). Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations. *DFI Journal*, 6(2), 26-38.
- MOE. (2012). *Result of survey on status of GSHP system installations*. Fonte: Ministry of Environment: <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15945>
- Moel, M. d., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., & Sun, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in. *Elsevier*, 2683–2696.
- Morino, T., & Oka, K. (1994). Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile. *Energy and Buildings*, 21, 65-78.
- Murphy, K. D., McCartney, J. S., & Henry, K. H. (2014). Thermo-mechanical response tests on energy foundations with different heat exchanger configurations. *Acta Geotechnica DOI: 10.1007/s11440-013-0298-4*. (pp. 1-17). Berlin: Springer.
-

- Nagano, K., Katsura, T., & Takeda, S. (2005). Thermal Characteristics of steel foundations piles as ground heat exchangers. *Proceeding of the 8th IEA Heat Pump Concecence*, (pp. 6-12). Las Vegas, NV.
- Narsilio, G. A., Francisca, F., Ferrero, H., Bidarmaghz, A., Serrano, C., & Perez, M. E. (2015). Geothermal Energy in Loess: A Detailed Numerical Case Study for Cordoba. *Proceedings of the 15th Pan-American Concecence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 704-711). Buenos Aires, Argentina: IOS PRESS.
- Neto, L. (2015). Estudo Experimental da Resposta Térmica de Fundações por Estacas Trocadoras de Calos em um Solo não Saturado. São Carlos, São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo-EESC.
- Park, H., Lee, S.-R., & Choi, S. Y.-C. (2012). Evaluation of thermal response and performance of PHC energy piles: Field experiments and numerical simulation. *Elsevier*, 103(C), 12-24.
- Peixoto, A. S. (2001). *Estudo do Ensaio SPT-T e sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Perazzolo, L. (2003). *Estudo Geotecnico de dois taludes da formação Serra Geral*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pöttering, H.-G. (2007). *CONCL 1*. EU. Brussels: Council of the European Union.
- Raymond, J. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy from Coast to Coast: a Review of Current Applications and Research in Canada. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, (pp. 1-10). Melbourne, Australia.
- Robertson, E. C. (1988). *Thermal Pproperties of rocks*. USGS. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Sekine, K., Ooka, R., Hwang, S., Nam, Y., & Shiba, Y. (2005). Development of a Ground Source Heat Pump System With Ground Heat Exchanger Utilizing the Cast-in-Place Concrete Pile. *Procedings of the Wold Sustainable Buildings Conference*, 1059-1066.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., & Kohl, T. (2007). Numerical Evaluation of Thermal Response Test. *Elsevier*, 36(2), 141-146.
- Song, Y., & Lee, T. J. (2015). Geothermal Development in the Republic of Korea: Country Update 2010-2014. Melbourne, Australia.
- Suryatriyasturi, M., & Burlon, H. M. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Elsevier*, 16(5), 3344-3354.
- Suryatriyastuti, M. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Elsevier*, 16, 3344-3354.
-

- U.S. Department of Energy. (2009). *Overview of Market Status, Barriers to Adoption, and Options for Overcoming Barriers: Final Report*. Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy. Washington: Navigant Consulting, Inc.
- Villar., O., Bortolucci, A., & Rodriguez, J. (1985). Geotechnical Characteristics of Tropical Cenozoic Sediments From Sao Carlos Region (Brazil). *Proc 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils* (pp. 461-471). Brasília: Brazilian Society for Soil Mechanics.
- Wadsö, L., Karlsson, J., & Tammo, K. (2012). Thermal properties of concrete with various aggregates. *Elsevier*, 1-25.
- Wagner, V., Bayer, P., Kübert, M., & Blum, P. (2012). Numerical sensitivity study of thermal response tests. *Elsevier*, 41, 245-253.
- Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., & Barry-Macaulay, D. (2013). Field investigation of a geothermal energy pile: Initial observations. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (pp. 3415-3418). Paris, France.
- Wood, C. J., Liu, H., & Riffat, S. B. (2009). Use of energy piles in a residential building, and effects on ground temperature and heat pump efficiency. *Géotechnique*, 59(3), 287-290.
- XiaobingLiu, Lu, S., & Chen, Z. C. (2015). A Comparative Study on the Status of GSHP Applications in US and China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 558-570. Fonte: Building Energy Efficiency Consortium: <https://cerceeb.lbl.gov/>
- Xu, W. (2008). *Report on China Ground-Source Heat Pump (2008)*. Beijing, China: China Architecture & Building.

## 8. ANEXOS

### ANEXO A - Informação geotécnica do solo silte-arenoso relacionado ao Residual da formação basáltica de Serra Geral (PERAZZOLO L, 2013).

Tabela 2.5. Ensaio cisalhamento direto realizados por Soares e Politano (1997).

Solo	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	Solo	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
coluvionar	18,4	10	32,5	residual	18,8	13	37
coluvionar	18,3	59	33	coluvionar	16,2	10	34
coluvionar	18,3	0	36	coluvionar	16,5	19	34
coluvionar	18,3	0	41	residual	15,2	8	43
residual	20	33	38				

Tabela 2.6. Resultados de ensaios cisalhamento direto realizados por Brugger et al. (1997).

Talude 1	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	Talude 2	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Colúvio	18,5	0	35	Colúvio	18,9	45	31
Colúvio	19	15	38	Colúvio	19,2	33	25
Residual	19,2	85	27	Colúvio	18,6	17	28
Residual	18,7	42	36	Colúvio	18,2	17	29
Residual	19,4	18	32	Residual	18,7	36	27
Residual	18	29	40	Residual	19,5	0	40
				Residual	19,4	35	31
				Residual	19,2	17	25

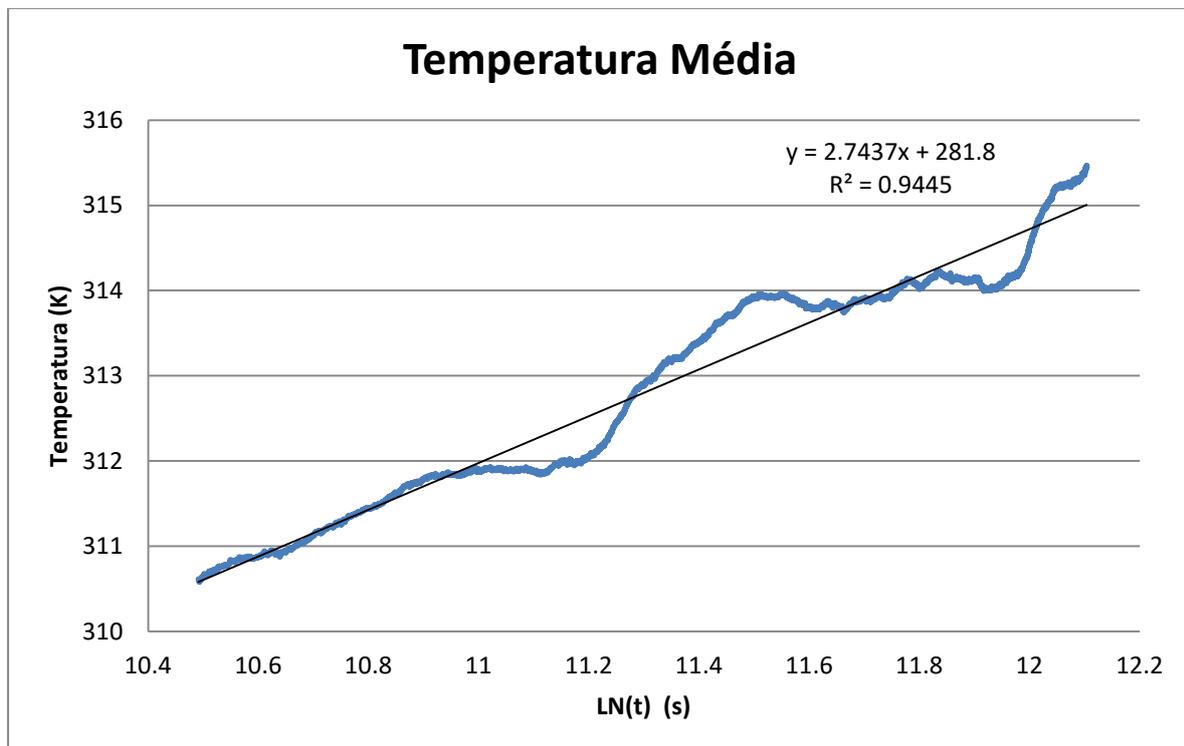
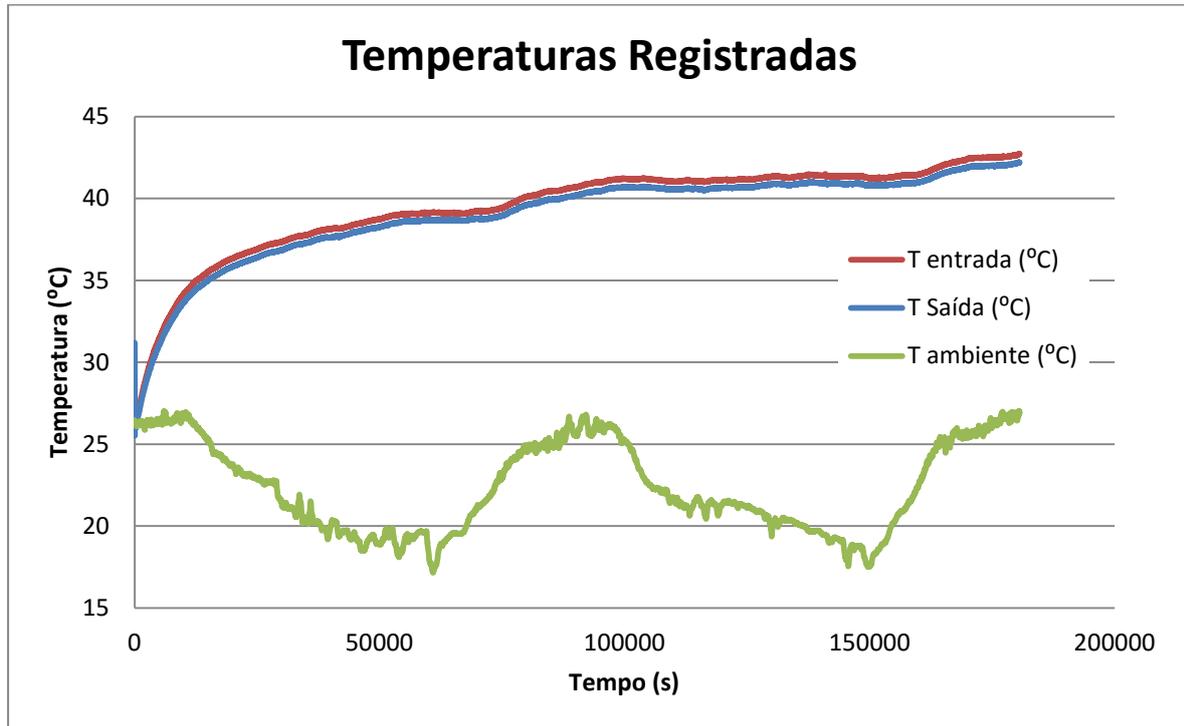
Tabela 2.8. Ensaio de condutividade hidráulica realizados por Campos et al. (1997).

Solo	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	IP	e	$\gamma_t$	k
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(kN/m <sup>3</sup> )	(cm/s)
Colúvio	2,5	48,5	20	29	16,4	1,23	15,5	10 <sup>-4</sup>
Saprolítico	5	47,5	22,5	25	15,6	0,87	17,6	10 <sup>-4</sup>

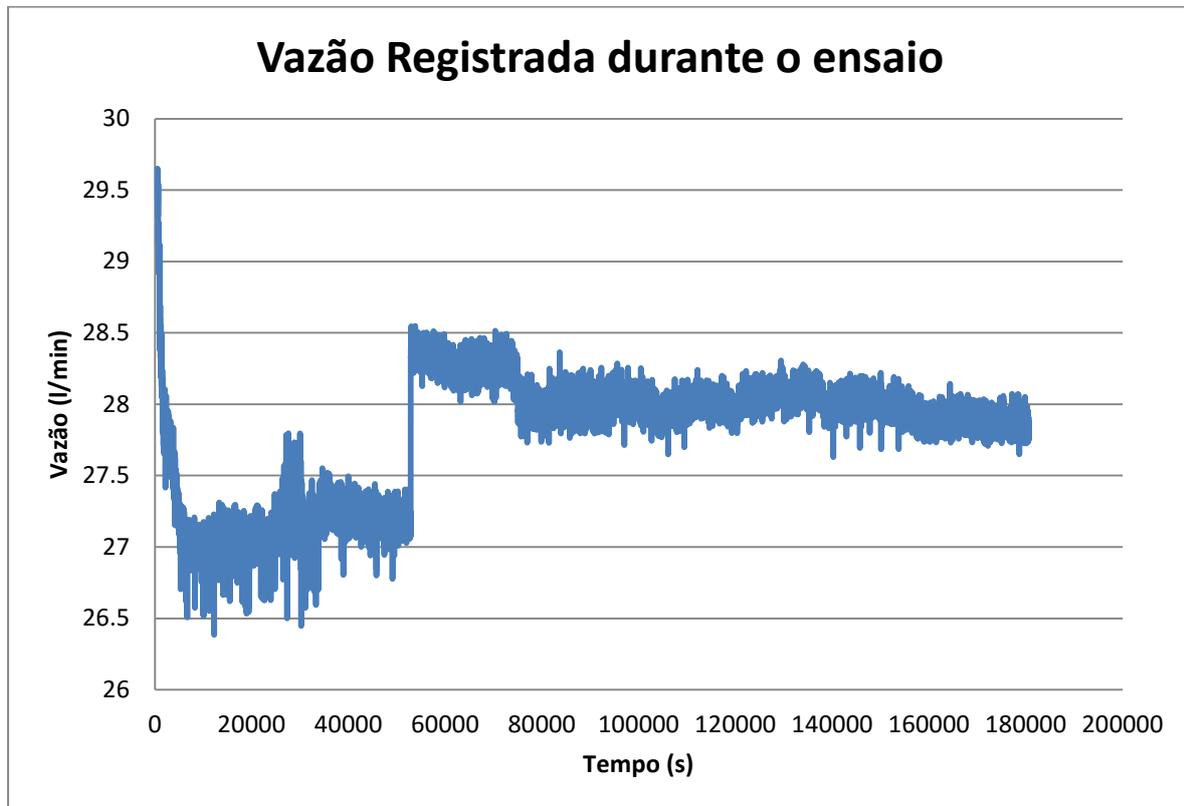
### ANEXO B - Informação da obtenção de umidades no campo experimental EESC/USP (PEIXOTO A. S, 2001)

**QUADRO 36 - Valores dos teores-de-umidade obtidas das amostras contidas nos amostradores do SPT-T – EESC - USP**

Profundidade (m)	w1	w2	w3	w4	w5	$\bar{w}$	sd	cv
1	18,1	13,7	14,2	14,8	13,9	14,94	1,81	12,15
2	16,7	15,9	15,3	16,3	14,8	15,80	0,76	4,82
3	18,7	17,3	16,2	17,7	16,2	17,22	1,06	6,16
4	17,4	15,9	16,7	19,0	17,3	17,26	1,14	6,61
5	17,7	17,1	17,8	19,2	18,2	18,00	0,78	4,32
6	17,9	19,5	20,8	15,3	17,6	18,22	2,08	11,42
7	20,3	19,5	20,7	20,5	21,2	20,44	0,62	3,05
8	20,4	18,4	18,9	18,6	20,2	19,30	0,93	4,83
9	21,4	19,3	20,4	20,2	22,2	20,70	1,12	5,42
10	20,7	20,8	21,6	16,3	21,1	20,10	2,15	10,71
11	22,4	22,0	22,4		23,2	22,50	0,50	2,24
12	25,1	22,7	22,4		24,5	23,68	1,33	5,61
13	26,1	34,0	27,4		25,1	28,15	4,01	14,25
14	27,4	29,1	39,6		31,2	31,83	5,41	17,00
15	20,7	22,3	26,2		21,1	22,58	2,51	11,12
16	31,3				29,9	30,60	0,99	3,24
17	21,9				19,4	20,65	1,77	8,56
18	24,3				19,8	22,05	3,18	14,43
19					20,6			
20					20,9			
21					20,4			
22					23,0			
23					53,1			
24					29,5			
25					25,1			
26					22,5			
27					24,1			

**ANEXO C - Temperaturas monitoradas experimentalmente durante o ensaio TRT - EESC/USP (Neto, 2015)**

**ANEXO D - Vazão monitorada experimentalmente durante o ensaio TRT - EESC/USP**  
(Neto, 2015)



**ANEXO E - Resultados Experimentais e numéricos (obtidos cada 15 min) do Teste de Resposta Térmica. Editado de Neto (2015)**

Tempo [s]	Resultados USP/EESC [°C]	Resultados COMSOL [°C]	%Erro				
				13500	34.66	34.75	0.24
				14400	34.86	34.93	0.19
				15300	35.08	35.11	0.10
0	31.18	23.80	23.67	16200	35.23	35.29	0.19
900	26.94	27.18	0.87	17100	35.38	35.47	0.26
1800	28.16	28.16	0.00	18000	35.55	35.61	0.19
2700	29.14	29.16	0.06	18900	35.70	35.72	0.08
3600	29.98	29.98	0.00	19800	35.81	35.83	0.07
4500	30.67	30.72	0.15	20700	35.91	35.94	0.09
5400	31.31	31.30	0.05	21600	36.02	36.05	0.09
6300	31.89	31.88	0.03	22500	36.15	36.17	0.04
7200	32.35	32.43	0.22	23400	36.24	36.28	0.11
8100	32.81	32.79	0.08	24300	36.33	36.39	0.17
9000	33.24	33.14	0.30	25200	36.41	36.50	0.23
9900	33.60	33.50	0.31	26100	36.53	36.61	0.21
10800	33.92	33.86	0.16	27000	36.64	36.72	0.22
11700	34.21	34.22	0.03	27900	36.70	36.80	0.29
12600	34.46	34.56	0.30	28800	36.77	36.88	0.30

29700	36.83	36.95	0.35	71100	38.75	38.96	0.56
30600	36.90	37.03	0.35	72000	38.75	39.03	0.72
31500	37.03	37.11	0.21	72900	38.80	39.10	0.77
32400	37.12	37.18	0.17	73800	38.85	39.17	0.81
33300	37.20	37.26	0.16	74700	38.91	39.24	0.83
34200	37.20	37.33	0.35	75600	39.00	39.31	0.79
35100	37.31	37.41	0.26	76500	39.17	39.38	0.52
36000	37.39	37.48	0.25	77400	39.26	39.44	0.47
36900	37.46	37.56	0.26	78300	39.40	39.51	0.29
37800	37.54	37.62	0.21	79200	39.50	39.58	0.21
38700	37.61	37.67	0.16	80100	39.62	39.65	0.08
39600	37.60	37.73	0.35	81000	39.68	39.72	0.09
40500	37.67	37.78	0.32	81900	39.71	39.79	0.19
41400	37.65	37.84	0.49	82800	39.80	39.85	0.13
42300	37.72	37.89	0.46	83700	39.88	39.91	0.06
43200	37.79	37.95	0.42	84600	39.96	39.96	0.01
44100	37.86	38.01	0.39	85500	39.94	40.01	0.18
45000	37.91	38.06	0.40	86400	39.96	40.06	0.25
45900	38.00	38.12	0.31	87300	40.00	40.12	0.30
46800	38.06	38.17	0.29	88200	40.11	40.17	0.14
47700	38.13	38.23	0.26	89100	40.14	40.22	0.21
48600	38.19	38.28	0.24	90000	40.19	40.27	0.22
49500	38.22	38.34	0.31	90900	40.21	40.33	0.29
50400	38.28	38.39	0.29	91800	40.31	40.38	0.16
51300	38.38	38.45	0.19	92700	40.37	40.43	0.16
52200	38.45	38.50	0.14	93600	40.41	40.48	0.17
53100	38.51	38.56	0.13	94500	40.44	40.54	0.23
54000	38.53	38.61	0.22	95400	40.48	40.59	0.27
54900	38.62	38.64	0.07	96300	40.55	40.62	0.17
55800	38.58	38.65	0.18	97200	40.62	40.63	0.03
56700	38.64	38.67	0.07	98100	40.64	40.63	0.02
57600	38.61	38.68	0.17	99000	40.66	40.63	0.07
58500	38.62	38.69	0.17	99900	40.67	40.64	0.08
59400	38.68	38.70	0.06	100800	40.68	40.64	0.10
60300	38.68	38.71	0.09	101700	40.66	40.65	0.03
61200	38.68	38.72	0.11	102600	40.66	40.65	0.03
62100	38.67	38.73	0.16	103500	40.69	40.65	0.09
63000	38.67	38.74	0.19	104400	40.69	40.66	0.09
63900	38.68	38.76	0.20	105300	40.66	40.66	0.00
64800	38.69	38.77	0.21	106200	40.64	40.67	0.06
65700	38.67	38.78	0.28	107100	40.59	40.67	0.21
66600	38.67	38.79	0.30	108000	40.60	40.67	0.17
67500	38.65	38.80	0.38	108900	40.55	40.68	0.31
68400	38.70	38.81	0.30	109800	40.53	40.68	0.36
69300	38.75	38.83	0.20	110700	40.55	40.69	0.34
70200	38.78	38.89	0.30	111600	40.57	40.69	0.30

---

112500	40.58	40.70	0.30	143100	40.91	40.99	0.19
113400	40.60	40.71	0.27	144000	40.90	41.00	0.23
114300	40.61	40.71	0.27	144900	40.88	41.01	0.32
115200	40.57	40.72	0.38	145800	40.89	41.02	0.30
116100	40.51	40.73	0.52	146700	40.89	41.03	0.33
117000	40.55	40.73	0.44	147600	40.92	41.04	0.28
117900	40.59	40.74	0.37	148500	40.89	41.05	0.38
118800	40.61	40.75	0.35	149400	40.82	41.06	0.58
119700	40.65	40.75	0.25	150300	40.79	41.07	0.68
120600	40.65	40.76	0.26	151200	40.80	41.08	0.69
121500	40.67	40.77	0.25	152100	40.80	41.09	0.72
122400	40.64	40.77	0.33	153000	40.79	41.10	0.75
123300	40.69	40.78	0.22	153900	40.84	41.11	0.66
124200	40.69	40.79	0.24	154800	40.82	41.12	0.74
125100	40.67	40.79	0.29	155700	40.90	41.13	0.57
126000	40.68	40.80	0.30	156600	40.94	41.14	0.50
126900	40.74	40.81	0.16	157500	40.90	41.15	0.60
127800	40.77	40.82	0.12	158400	40.92	41.16	0.58
128700	40.82	40.83	0.01	159300	40.94	41.17	0.57
129600	40.82	40.84	0.04	160200	41.00	41.18	0.45
130500	40.89	40.85	0.11	161100	41.08	41.19	0.27
131400	40.90	40.86	0.12	162000	41.15	41.23	0.20
132300	40.84	40.87	0.06	162900	41.28	41.28	0.01
133200	40.81	40.88	0.17	163800	41.40	41.32	0.19
134100	40.83	40.89	0.13	164700	41.50	41.37	0.32
135000	40.86	40.90	0.08	165600	41.59	41.41	0.42
135900	40.91	40.91	0.00	166500	41.67	41.46	0.50
136800	40.93	40.92	0.04	167400	41.73	41.50	0.55
137700	40.99	40.93	0.14	168300	41.77	41.55	0.52
138600	40.96	40.94	0.07	169200	41.83	41.60	0.56
139500	40.95	40.95	0.01	170100	41.92	41.64	0.66
140400	40.93	40.96	0.06	171000	41.95	41.69	0.64
141300	40.89	40.97	0.18	171900	41.95	41.73	0.53
142200	40.90	40.98	0.19	172800	41.96	41.78	0.44

---