

**AVALIAÇÃO TERMOMECÂNICA DE UMA ESTACA ESCAVADA
SUBMETIDA A GRADIENTES TÉRMICOS.**

BRUNELLA CASAGRANDE BRUNELLI SANTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO - 2020**

**AVALIAÇÃO TERMOMECÂNICA DE UMA ESTACA ESCAVADA
SUBMETIDA A GRADIENTES TÉRMICOS.**

BRUNELLA CASAGRANDE BRUNELLI SANTOS

“Dissertação apresentado ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil”.

Orientador: Professor Fernando Saboya

Laboratório de Engenharia Civil
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
Campos dos Goytacazes, setembro de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

B894 Brunelli, Brunella Casagrande.

Avaliação termomecânica de uma estaca submetida a um gradiente de temperatura /
Brunella Casagrande Brunelli. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

87 f. : il.

Bibliografia: 81 - 86.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientador: Fernando Saboya Albuquerque Junior.

1. Estaca Térmica. 2. Histerese Termomecânica. 3. Teste de Resposta Térmica. I.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

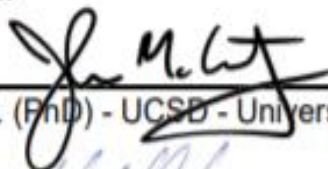
CDD - 624

BRUNELLA CASAGRANDE BRUNELLI SANTOS

Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 30 de setembro de 2020.

Comissão examinadora:



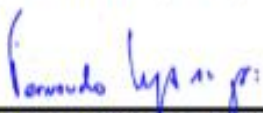
John S. McCartney. (PhD) - UCSB - University of California – San Diego



Renato Pinto da Cunha. (PhD) - UNB - Universidade de Brasília



Sérgio Tibana. (D.Ss). - UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense – Darcy Ribeiro



Fernando Saboya Jr. (D.Sc.) - (Orientador) - UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense – Darcy Ribeiro

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre comigo, me guiando, iluminando cada passo meu. Obrigada por me dar a força necessária para lutar e enfrentar todos os obstáculos, sem nunca desistir.

Agradeço aos meus pais, Rita e César e ao meu irmão, Júlio César, pela compreensão, ao serem privados em muitos momentos da minha companhia e atenção, e pelo profundo apoio, me estimulando nos momentos mais difíceis. Obrigada por desejarem sempre o melhor para mim, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse superar cada obstáculo em meu caminho e chegar aqui e, principalmente, pelo amor imenso que vocês têm por mim. À vocês, minha família, sou eternamente grata por tudo que sou e por tudo que consegui conquistar. Sinto-me orgulhosa e privilegiada por ter pais tão especiais e um irmão tão maravilhoso.

Agradeço ao meu amado marido e companheiro nessa vida, Leonardo, pelo amor, partilha, companheirismo e apoio incondicional, agradeço a enorme compreensão, generosidade e alegria com que me brindou constantemente, contribuindo para chegar ao fim deste percurso. Agradeço por cada plantão extra feito para que eu pudesse concluir essa etapa com tranquilidade. Foram muitos dias de trabalho, de ausência, de preocupação com a estrada, mas que no fim valeram a pena. Agradeço por ter me ensinado a buscar sempre excelência em meus objetivos, admiro e me inspiro em você como profissional.

Agradeço imensamente ao meu orientador e amigo Fernando Saboya por sempre ter acreditado em mim desde o início do meu ciclo na UENF, por ter feito eu me apaixonar pelo ramo menos exato da engenharia civil, a geotecnia. E por fim, por sempre ter me ensinado tanto e compartilhando tanto conhecimento. A você, minha eterna gratidão e admiração.

Agradeço ao meu amigo Milton, por todos os capuccinos e biscoitos compartilhados durante esse tempo, por todas as conversas leves, risadas, conselhos e por todo conhecimento passado.

À equipe da Centrífuga Geotécnica da UENF, André, Cássia, Eberton, Renato, Rodrigo, Professor Tibana, Matheus e Walber que sempre tiveram muita paciência e me auxiliaram de maneira exemplar e com extrema competência durante esse projeto. Sem vocês, isso não seria possível. Agradeço por todas as conversas, por todos os momentos alegres dividindo os bolos feitos por mim, por todas as pausas para o café, por todas as risadas e por todo aprendizado. Sempre me lembrarei de vocês com muito carinho.

Agradeço à minha amiga Livia, por sempre estar ao meu lado durante essa fase, pelo companheirismo, força e por tornar essa trajetória mais leve. Agradeço por termos compartilhado risadas, angústias e baldes de café. Agradeço por estarmos sempre juntas e por ser minha companheira de estudos até as 23 horas no LECIV. Com certeza esse ciclo teria sido bem mais difícil sem essa amizade.

Finalmente, mais uma vez, agradeço à tudo e à todos que de alguma forma me ajudaram nesta fase. Muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos.....	5
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 - Energia geotérmica.....	6
2.1.1- GSHP – <i>Ground Source Heat Pumps</i>	8
2.2 - Estacas térmicas.....	9
2.3 - TRT (Teste de Resposta Térmica).....	12
2.3.1 – Interpretação dos resultados obtidos no TRT	14
2.4 - Comportamento termomecânico.....	16
2.5 –Comportamento do solo quando submetido a um carregamento térmico	19
2.5.1 – Histerese.....	21
2.6 - Deslocamento no topo da Estaca	21
2.7 – Distribuições de temperatura no subsolo	24
2.8 - Propriedades térmicas do solo.....	24
2.9 – Histórico de ensaios em estaca geotérmica no Brasil.....	27
2.9.1 – Histórico de ensaios em estaca geotérmica da UENF.....	28
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 – Perfil do solo	30

3.2 – Montagem do ensaio.....	31
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	42
4.1 -Flutuação do nível do lençol freático.....	42
4.2 Comportamento térmico do solo	43
4.2.1 – TRT#1 – Comportamento Térmico	43
4.2.2 – TRT #2 – Comportamento Térmico	46
4.2.3 - TRT #3 – Comportamento Térmico.	50
4.2.4 - Comparativo entre TRT 1, 2, 3 – Comportamento Térmico.....	53
4.3 - Comportamento Termomecânico - TRT#1, 2 e 3.....	54
4.4 – Análise da histerese.....	65
4.5 - Análise do deslocamento total no topo da estaca.....	68
4.5.1 – TRT#1 – Deslocamento no topo da estaca.....	69
4.5.2 – TRT#2 – Deslocamento no topo da estaca.....	71
4.5.3 – TRT#3 – Deslocamento no topo da estaca.....	73
4.5.4 – Comparativo 3 ensaios – Deslocamento no topo da estaca	74
4.6 – Análise do ponto nulo.....	76
5.0 - CONCLUSÃO	79
6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO I.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Progressão da emissão de CO ₂ no cenário mundial. (FONTE: Global Carbon Budget 2018).....	1
Figura 2 - Consumo de energia global anual (FONTE: Global Carbon Budget 2018).	2
Figura 3 - Principais sistemas de circuito fechado para troca de calor: a) sistema em espiral, b) Vertical, c) Lagoa, d) Horizontal. (FONTE: Self et al., 2013)	4
Figura 4 - Variação de temperatura (°C) com a utilização de cada tipo de energia	6
Figura 5 - Perfil de temperatura no subsolo na cidade de São Carlos, Brasil (FONTE: Morais e Tshua ,2016)	7
Figura 6 - Bomba GSHP. (Fonte: GSH PA, 2010).....	8
Figura 7 - Estrutura energética de um sistema trocador de energia - COP=4. (FONTE: Brandl, 2008).....	9
Figura 8- Estacas Térmicas –Elementos de Dupla finalidade (FONTE: Olgun & McCartney. 2014).....	10
Figura 9 - Set-up usual do TRT (Gehlin, 2000)	13
Figura 10 - Mecanismo de transferência de carregamento de uma estaca submetida a carregamento termomecânico; (a) aquecimento e (b) resfriamento sem restrição (adaptado de Bourne Webb et al., 2009)	17
Figura 11 - Mecanismo de transferência de carregamento de uma estaca submetida a carregamento termomecânico; (a) Ambas as extremidades parcialmente restritas e (b) topo com restrição e base sem restrição (adaptado de Bourn Webb et al., 2009)	18
Figura 12 - Distribuição da resistência lateral versus profundidade (Adaptado de McCartney e Rosemberg, (2011)).....	20
Figura 13 - Carregamento na estaca - Deslocamentos obtidos no topo da estaca devido a ciclos de carregamento termomecânico, (FONTE: Yavari et al, 2016a)	22

Figura 14 - Valores experimentais e calculados de condutividade térmica normalizada versus grau de saturação. (Adaptado de Akrouch, 2012)	26
Figura 15 -Variação da condutividade térmica com a porosidade para solos não saturados (FONTE: Yun & Santamarina, 2008)	26
Figura 16 - Taxa de transferência de calor (a) Resfriamento e (b) Aquecimento (FONTE: Choir, 2011)	27
Figura 17 - Perfil longitudinal do solo	30
Figura 18 - Identificação da localização da estaca térmica (FONTE: Google Earth).31	
Figura 19 - Tubo PEX trocador de calor em forma de "U" preso a armadura da estaca	32
Figura 20 - Disposição, nomenclatura e profundidade dos sensores na estaca térmica.	33
Figura 21 - Strain Gauge instalado na armadura	33
Figura 22 - Detalhamento do quadro de medição dos extensômetros e termopares 34	
Figura 23 - Detalhamento do quadro de medições e do aterramento.	34
Figura 24 - Perfil estrutural de alumínio.	35
Figura 25 - Peça de aço inox.....	35
Figura 26 - Esquema das Barras rosqueadas presas por Porcas Soldadas	36
Figura 27 - Transdutor de Deslocamento Linear - PY2. (FONTE: Gefran).....	36
Figura 28 - Esquema de instalação dos Transdutores de Deslocamento Linear	37
Figura 29 - Disposição dos equipamentos in loco.	38
Figura 30 - Viga de referência com apoio fixo	38
Figura 31 - Peça de champoxy desenvolvida para o sistema de apoio móvel.	39
Figura 32 - Viga de referência com apoio móvel.	39
Figura 33 - Tanque isolado termicamente.	40
Figura 34- Disposição final dos equipamentos para o ensaio.	41

Figura 35 - Variação do nível d'água no Campos experimental da UENF – Campos dos Goytacazes.....	42
Figura 36 - Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#1.....	44
Figura 37- Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido – TRT#1	44
Figura 38 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio – TRT#1	45
Figura 39 - Carga térmica real depositada no ensaio – TRT#1.....	45
Figura 40 - temperatura do fluido x $\ln t$ (s) – TRT#1.....	46
Figura 41 -Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#2.....	47
Figura 42 - Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido (TRT#2)	48
Figura 43 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio (TRT#2)	48
Figura 44 - Carga térmica real depositada no ensaio (TRT#2)	49
Figura 45 - Temperatura do fluido x $\ln t$ (s) – TRT#2.	49
Figura 46 - Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#3.....	51
Figura 47 - Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido (TRT#3)	51
Figura 48 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio (TRT#3)	52
Figura 49 -Carga térmica real (Q) depositada no ensaio (TRT#3)	52
Figura 50- Temperatura do fluido x $\ln t$ (s) – TRT#3.	53
Figura 51 - Perfil de gradiente de temperatura.....	56
Figura 52 - Perfil de deformação térmica	57
Figura 53 - Perfil de Tensão térmica induzida ao longo dos ensaios.	58
Figura 54 - Incrementos de Deformação Térmica versus incremento de Temperatura	60
Figura 55 - Coeficiente de Expansão Térmica ao longo da profundidade para cada teste	61
Figura 56 - Coeficiente de expansão térmica mobilizado em cada profundidade em cada ensaio.	64

Figura 57 - Grau de liberdade ao longo da estaca.	65
Figura 58 - Deformação residual - TRT#1	67
Figura 59 - Deformação residual - TRT#2	67
Figura 60 - Deformação residual - TRT#3	68
Figura 61 - Comparação da deformação residual - TRT#1, TRT#2 e TRT#3.	68
Figura 62 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#1	70
Figura 63 - Carregamento Térmico TRT#1	71
Figura 64 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#2.	72
Figura 65 - Carregamento Térmico - TRT#2	72
Figura 66 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#3.	73
Figura 67 - Carregamento Térmico - TRT#3	74
Figura 68 - Relação comparativa entre Carga Térmica e Temperatura entre os 3 ensaios.....	75
Figura 69 - Análise do ponto nulo para cada ensaio.	77
Figura 70 - Comparação entre os 3 ensaios em termos de ponto nulo.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia no Brasil e no Mundo (FONTE: Resenha energética Brasileira, 2018).....	3
Tabela 2 - Exemplos de aplicação de estruturas termoativas (VT Nguyen, 2017)	11
Tabela 3 - Propriedades térmicas médias do solo (Lhendup, 2014).	25
Tabela 4 - Síntese do Teste de Resposta Térmica (TRT) realizados no Brasil.....	29
Tabela 5 - Temperatura do solo não perturbado – TRT#1	43
Tabela 6 - Temperatura do solo não perturbado TRT#2	47
Tabela 7 -Temperatura do solo não perturbado TRT#3	50
Tabela 8 - Comparativo entre os 3 TRTs	53

RESUMO

Estudos acerca do comportamento das Estacas Térmicas em países tropicais não são tão notórios quando comparados a Europa ou a regiões de clima temperado, onde a maioria da utilização é direcionada a extração de calor do subsolo. Não obstante a esse cenário, poucos dados têm sido publicados a respeito das estacas térmicas escavadas, na qual o solo circundante sofre bastante influência do processo construtivo, principalmente em sua base. Neste trabalho, são mostrados Testes de Respostas Térmica (TRTs) em uma estaca instrumentada disposta 12m em solo sedimentar tropical. Sensores de corda vibrante foram instalados a fim de avaliar a performance mecânica da estaca submetida somente a carregamentos térmicos, além disso, foram realizadas medições do deslocamento da cabeça da estaca ao longo dos ensaios. Os resultados revelam que a distribuição de temperatura ao longo da estaca e as tensões térmicas geradas são extremamente dependentes das condições do subsolo e não apresentam homogeneidade ao longo da estaca. Alguns fatos foram claramente observados pela análise do coeficiente de expansão térmica mobilizado. Histerese térmica também foi observada na camada de argila orgânica, localizada entre 8-10 m de profundidade.

Palavras Chave: Estaca Térmica, Histerese Termomecânica, Teste de Resposta Térmica.

ABSTRACT

Data regarding energy pile behavior in tropical climate regions is not as readily available as in temperate climate regions, which are generally heating dominated (i.e., focused on extracting heating from the subsurface). Further, there has not been a major effort to understand the behavior of micropiles converted into energy piles, which may have different behavior from other energy piles due to the disturbance associated with installation, especially at the toe. This work presents the results of a series of thermal response tests (TRTs) on a 12 m-long instrumented energy micropile installed in a sedimentary tropical soil to understand the impacts of heating and cooling cycles. Vibrating wire strain gauges embedded within the energy micropile were used to assess the mechanical performance of the pile when subject to changes in temperature, along with, head displacement was accounted during the tests. Results indicate that the temperature distribution with depth and the resulting thermal axial strains are strongly dependent on the subsoil stratigraphy and are far from being homogeneous along the length of the pile. In particular, the temperature gradients across interfaces with an organic clay deposit were found to have a major effect on the thermal axial strains. Hysteresis in the thermal axial strains during the process of heating and cooling was also analyzed and was found to represent a diminishing effect on the mobilized coefficient of thermal expansion with each cycle.

Keywords: Energy Piles, Thermo-Mechanical Hysteresis, Thermal Response Test.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Se por um lado, a energia é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico, por outro, ela representa um dos principais setores que impactam negativamente o meio ambiente. Por conta disso, a questão energética torna-se cada vez mais um importante tópico na agenda de planejamento tanto dos países desenvolvidos, como dos países em desenvolvimento. E, conseqüentemente, no contexto de Planejamento Energético, novas fontes de energia surgem como alternativas fundamentais para superar a futura escassez relacionadas a fontes de energia não renováveis e a poluição ambiental causada por essas fontes, onde, segundo o *Global Carbon Budget 2018*, o dióxido de carbono representa em torno de 58,8% dos gases do efeito estufa. A Figura 1 mostra o aumento progressivo anual na emissão de CO₂ no cenário mundial.

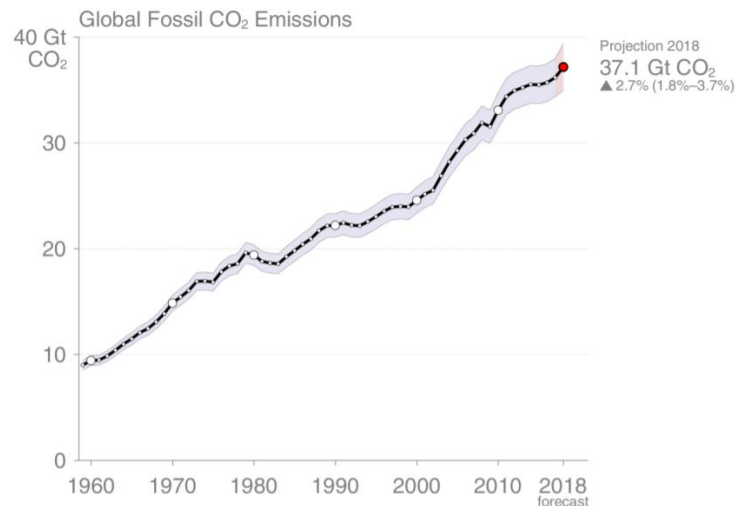


Figura 1 - Progressão da emissão de CO₂ no cenário mundial. (FONTE: Global Carbon Budget 2018)

Apesar da importância dada nos últimos anos à questão ambiental, o setor energético mundial ainda continua sendo extremamente não renovável. Porém, no crescimento anual, o setor renovável apresenta os maiores valores de incremento anual, cerca de 14% ao ano segundo a *Global Carbon Budget (2018)* (Figura 2).

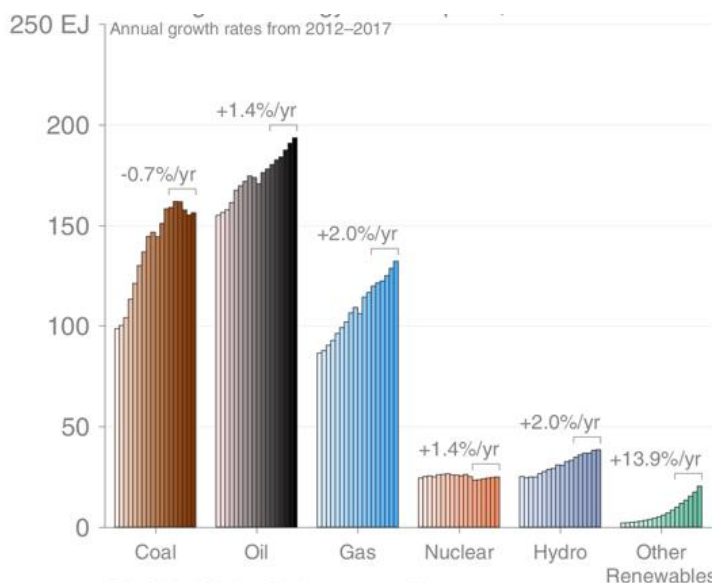


Figura 2 - Consumo de energia global anual (FONTE: Global Carbon Budget 2018)

Tendo em vista a necessidade de produzir-se energia elétrica de forma mais limpa e em quantidades cada vez maiores, o estudo das energias renováveis vêm ganhando cada vez mais notoriedade no cenário mundial, seja no aprimoramento de fontes atuais ou no desenvolvimento de novas fontes energéticas que propiciem energia de forma sustentável e limpa, já que a maioria dos recursos hoje utilizados em maior escala para a geração de energia é finito e emissora de gases do efeito estufa.

Uma das vertentes que mais vem crescendo em países desenvolvidos da América do Norte, Europa e Ásia é a utilização da energia geotérmica. Em comparação com outras fontes renováveis, o calor geotérmico é vantajoso, uma vez que está disponível diariamente e em todas as estações do ano. Entretanto, de acordo com a IEA (2018), em regiões tropicais e especialmente nas economias emergentes – BRICS (Brasil, Rússia, China e África do Sul) ainda não exploram seu grande potencial.

No Brasil tem ocorrido a ampliação do uso de fontes renováveis, como as centrais hidrelétricas, as energias solar e eólica, biocombustíveis, mas ainda há necessidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis ainda não consolidadas, como a geotérmica. (Tabela 1)

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia no Brasil e no Mundo (FONTE: Resenha energética Brasileira, 2018)

Fonte	Brasil		OCDE		Outros		Mundo	
	1973	2017	1973	2017	1973	2017	1973	2017
Derivados de Petróleo	45,6	36,2	52,6	35,9	29,9	25,8	46,1	32,0
Gás Natural	0,4	12,9	18,9	27,6	12,9	20,4	16,0	22,4
Carvão Mineral	3,2	5,6	22,6	16,5	31,1	35,3	24,6	26,5
Urânio	0	1,4	1,3	9,7	0,2	2,3	0,9	5,0
Hidro	6,1	11,9	2,1	2,3	1,2	2,5	1,8	2,5
Outras não Renováveis	0	0,6	0	0,5	0	0,1	0	0,3
Outras Renováveis	44,8	31,2	2,5	7,7	24,7	13,6	10,6	11,3
<i>Biomassa Sólida</i>	44,3	23,9	2,4	4,2	24,7	12,0	10,5	8,9
<i>Biomassa Líquida</i>	0,5	6,1	0	1,02	0	0,19	0	0,63
<i>Eólica</i>	0	1,24	0	1,12	0	0,41	0	0,69
<i>Solar</i>	0	0,024	0	0,64	0	0,48	0	0,52
<i>Geotérmica</i>	0	0	0,16	0,64	0	0,53	0,1	0,55
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>dos quais renováveis</i>	50,8	43,2	4,6	10,0	26,0	16,1	12,5	13,8
Total - Mtep	82,2	293,5	3.741	5.293	2.105	7.850	6.109	13.822
<i>% do mundo</i>	1,3	2,1	61,2	38,3	34,5	56,8		

Notas: a) estimativas N3E/MME para o último ano, a exceção do Brasil; b) somente o Mundo inclui bunker: 2,7% da OIE em 2017; c) carvão inclui gases da indústria siderúrgica; d) "outros" exclui OCDE e Brasil

Como se pode ver, mais da metade da matriz energética brasileira é composta por fontes não renováveis; além disso, cerca de 80% da atual matriz promove a emissão de gases do efeito estufa, como é o caso do óleo, da hidroeletricidade e do gás.

Segundo dados levantados pelo SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa), em 2014, no Brasil, o setor energético foi responsável por 31% das emissões totais de gases como o dióxido de carbono (CO₂), hidrofluocarbonos (HFCs), metano (CH₄) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) que geram o agravamento do efeito estufa e, conseqüentemente, favorecem o aquecimento global.

Somado a isso, o Brasil assinou o Protocolo de Montreal se comprometendo a reduzir em 20% o uso de HFCs até 2045, os níveis utilizados na média entre os anos de 2020 a 2022. Dessa forma, tanto pelo crescimento na demanda de energia quanto pela necessidade de uma matriz energética mais sustentável, torna-se cada vez mais necessário o estudo de novas fontes energéticas, o aprimoramento das fontes atuais e, sobretudo, de fontes que sejam renováveis e limpas, já que a maioria dos recursos hoje utilizados em maior escala para a geração de energia são finitos e emissores de gases do efeito estufa.

A energia geotérmica pode ser utilizada de variadas formas e sua utilização para a climatização de edificações tem crescido mundialmente. Utiliza-se do subsolo como fonte de calor, aproveitando as temperaturas moderadas do mesmo, sendo estas relativamente regulares em determinada profundidade, o que o torna uma fonte de calor estável para realizar a troca energética de forma eficiente. Este fato a

torna uma opção atraente para fornecimento de energia sustentável. Somado a esta ideia, corrobora o fato de a energia geotérmica ser considerada uma forma limpa e ecológica de energia, ao permitir a geração e a venda de eletricidade com baixa emissão de poluentes nocivos na atmosfera (Hurtera; Schellschmidt, 2003).

Há diversas maneiras de se extrair a energia geotérmica do solo para este fim e uma delas é através da inserção de tubulações no subsolo para realizar trocas térmicas entre o solo e o ambiente a ser climatizado. Nesse caso, um fluido passa no interior da tubulação e é responsável por transportar o calor do solo para a edificação, e vice-versa, dependendo da finalidade da climatização, seja para resfriar ou aquecer o ambiente.

A tubulação trocadora de calor pode ser disposta no solo horizontalmente, verticalmente ou até mesmo em lagos como mostrado na Figura 3. Além disso, a tubulação também pode ser inserida em elementos estruturais da edificação que estejam em contato com o solo, para permitir as trocas térmicas solo-edificação. Elementos estruturais como estacas comuns, radiers, estacas barretes, sistemas de contenção, como paredes diafragma, podem ser utilizados para a inserção da tubulação trocadora de calor (Ferreira 2017).

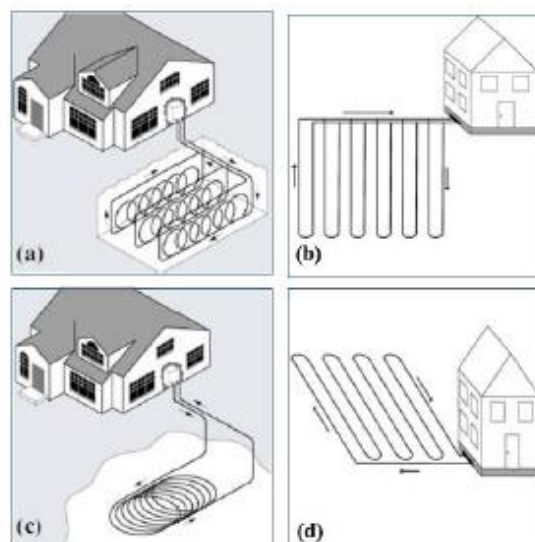


Figura 3 - Principais sistemas de circuito fechado para troca de calor: a) sistema em espiral, b) Vertical, c) Lagoa, d) Horizontal. (FONTE: Self et al., 2013)

Os sistemas que se utilizam de elementos já empregados na edificação, apresentam como vantagem sobre os sistemas em que a tubulação é inserida diretamente no solo, o fato de não serem necessárias escavações adicionais para a

implantação do sistema trocador de calor, o que é vantajoso economicamente. Além disso, quando se fala especificamente de estacas, a geometria das mesmas facilita as trocas térmicas pelo fato deste ser um elemento esbelto e que alcança grandes profundidades do subsolo, além do concreto possuir propriedades térmicas adequadas às trocas térmicas.

1.1 – Objetivos

Estacas térmicas são elementos estruturais de dupla finalidade construídos no subsolo para trocar calor entre uma edificação e a superfície enquanto também transferem cargas da estrutura para o solo. Trata-se de uma fundação profunda conectada conjuntamente e acoplada a uma bomba de calor equipada com um sistema de canalização, de modo que um fluido transportador de calor pode circular permitindo a troca de calor entre o solo e à estaca.

Como objetivo principal deste projeto tem-se:

- Avaliação do deslocamento no topo de uma estaca raiz submetida a variações de temperatura.
- Avaliação do efeito dos ciclos de cargas térmicas no comportamento mecânico da fundação.
- Avaliação da histerese devido aos ciclos de aquecimento e resfriamento impostos na estaca.
- Avaliação do efeito de um carregamento térmico mais elevado na estaca e no solo circundante.

Para a realização destas atividades foram realizados TRTs (Thermal Response Test) acompanhado de medições de temperatura e de deformações induzidas na estaca instalada em solo sedimentar. Esses dados ofereceram subsídios para a elaboração de uma avaliação geomecânica do sistema solo x estaca quando submetidos a gradientes térmicos, que por sua vez submetem à estaca a esforços adicionais podendo levar a estrutura a ruína.

Foi desenvolvido um sistema de medição de deslocamento da cabeça da estaca, através de uma viga de referência e transdutores de deslocamento linear dispostos no topo da estaca. Foi realizado também um poço para medição constante do NA.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Energia geotérmica

As fontes alternativas de energia têm sido cada vez mais utilizadas mundialmente. Com intuito de reduzir o consumo de energia elétrica e minimizar os danos causados pelas fontes não renováveis, opções sustentáveis tornaram-se populares e necessárias em projetos modernos.

Entre as fontes alternativas utilizadas está a energia geotérmica que representa a energia armazenada em forma de calor contida no interior da terra. Sua utilização depende de fatores como a distribuição de temperatura disponível em cada local. Segundo a ASHRAE (2017), existem três tipos de classificação mais comuns das fontes de recursos geotécnicos.

A classificação varia de acordo com a profundidade e a temperatura contida no subsolo, onde aplicação para temperaturas acima de 150 °C são especificamente para geração de energia elétrica, já temperaturas moderadas entre 150 e 30°C são utilizadas para aplicação direta, e a mais abundante e de exploração acessível é encontrada a baixas temperaturas, em torno de 30°C e é utilizada para climatização de ambientes operando através de GSHP (figura 4).

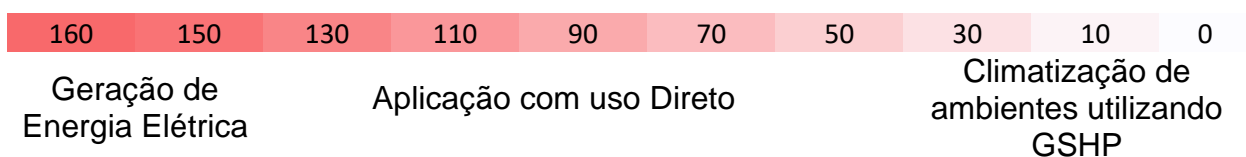


Figura 4 - Variação de temperatura (°C) com a utilização de cada tipo de energia

A temperatura do subsolo pode ser influenciada por fatores climáticos, estrutura e propriedades físicas do solo assim como sua cobertura natural. Essas propriedades exercem grande influência na capacidade do subsolo de transferir calor e da estrutura de trocar calor. A utilização da energia contida nas camadas mais superficiais da terra depende da distribuição de temperatura no subsolo, segundo Popiel (2001) e Wang & Qi(2007), essa distribuição é dividida em 3 zonas:

- Zona superficial: Passa por amplas variações de temperatura, que se alteram com as mudanças climáticas. Essa zona compreende camadas de aproximadamente 1 metro de profundidade.

- Zona de baixa profundidade: Menos sensível as variações climáticas quando comparada a zona superficial, sua profundidade varia de 2 à 8 metros, dependendo da presença do nível d'água. Possuindo temperaturas próximas a média anual da temperatura do ar

- Zona Profunda: caracterizada por temperaturas estáveis durante todo o ano localizada em profundidades maiores que 10 metros.

Utiliza-se o subsolo como fonte de calor, aproveitando as temperaturas moderadas do mesmo visto que a partir de determinada profundidade a temperatura do mesmo é praticamente constante. Segundo Brandl (2006), na maioria das regiões europeias, a temperatura do subsolo é relativamente constante a partir de 10 a 15 metros de profundidade, mesmo se tratando de épocas sazonais distintas. Bandeira Neto (2015) e Morais e Tshua (2016) observaram que a temperatura em solos tropicais se estabiliza a partir de uma profundidade entre 3 e 4 metros (Figura 5). Vilela (2004) também afirma que a partir de uma profundidade entre 5 e 6 metros, a temperatura do solo Brasileiro não sofre variação considerável, o que o torna uma fonte estável para realizar a troca de calor de forma eficiente (Brandl, 2006).

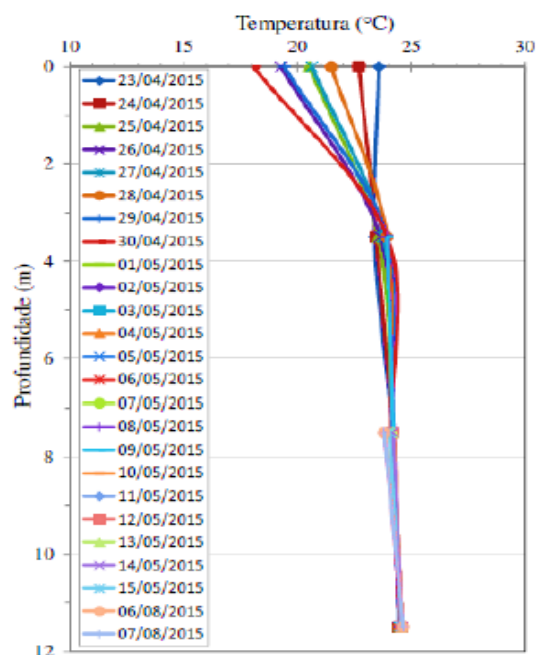


Figura 5 - Perfil de temperatura no subsolo na cidade de São Carlos, Brasil (FONTE: Morais e Tshua, 2016)

2.1.1- GSHP – *Ground Source Heat Pumps*

Os GSHP são bombas de calor projetadas para mover a energia térmica na direção oposta ao fluxo espontâneo de calor. São operadas realizando um ciclo termodinâmico.

Normalmente o arranjo mais utilizado é o fechado (*Closed-loop system*) por possuir vantagem de não afetar o ecossistema e ser menos suscetível as variações climáticas (Figura 6). É formado por uma rede subterrânea de tubos de polietileno de alta densidade (HDPE), flexíveis, de alta resistência mecânica e boa condutibilidade térmica dispostos verticalmente, em furos ou poços. Esses tubos atuam como trocador de calor, transferindo energia térmica de ou para o meio em que são imersos (VILELA,2004).

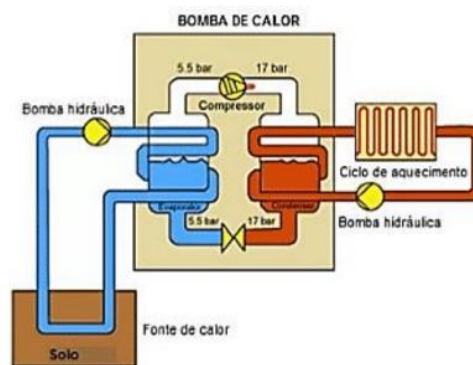


Figura 6 - Bomba GSHP. (Fonte: GSH PA, 2010)

Apenas o solo não é suficiente para fazer as trocas térmicas, ainda é necessária uma bomba elétrica para fazer o fluido circular e a própria bomba de calor com o fluido refrigerante, logo o sistema de bomba de calor consiste em três circuitos:

- (i) Circuito primário: Composto por tubos verticais (*boreholes*) ou horizontais (trincheiras). Representa a conexão do sistema com o solo;
- (ii) Bomba de Calor que corresponde à manifestação de ciclos de Carnot e o seu funcionamento baseia-se nos princípios básicos da termodinâmica;
- (iii) Circuito Secundário: consiste na distribuição de calor na edificação.

Para avaliar estabilidade do sistema, Brandl (2006) apresenta o parâmetro COP (Coefficient of Performance), relacionando a energia total que requer o sistema para

atingir a temperatura necessária e a energia elétrica consumida pela bomba no processo (ANDRADE 2017)

$$COP = \frac{\text{mudança de energia total do sistema (kW)}}{\text{Energia de operação da bomba (KW)}}$$

Para que o sistema seja viável e atrativo ao mercado, se faz necessário que o conjunto trocador com o solo contribua com a maior parte do trabalho energético (ANDRADE, 2017). Na Figura 7 tem-se a representação esquemática de um sistema trocador de energia, com COP=4, onde a energia elétrica necessária para o funcionamento do sistema representa $\frac{1}{4}$ da energia total, garantindo assim eficiência ao sistema.

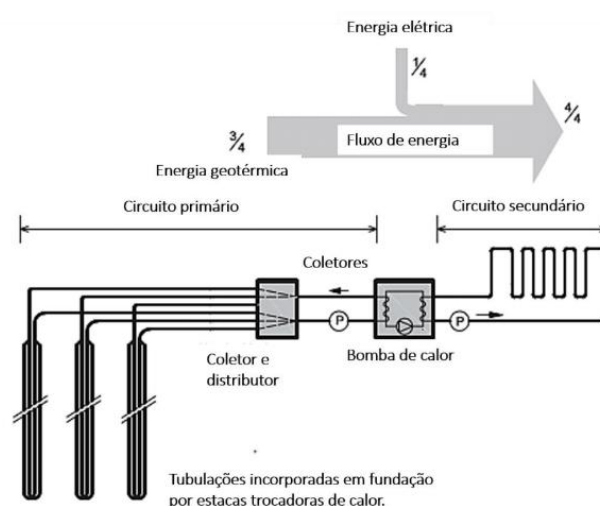


Figura 7 - Estrutura energética de um sistema trocador de energia - COP=4. (FONTE: Brandl, 2008)

2.2 - Estacas térmicas

Elementos termo-ativos, consistem em estruturas geotécnicas convencionais (e.x. estaca, túneis, parede diafragma, etc.) acopladas de uma série de circuitos de tubos trocadores de calor (HDPE) através dos quais circula um fluido transportador de calor (água ou água + glicol) a fim de promover a troca de calor com o solo que o circunda aumentando a eficiência e reduzindo os custos operacionais dos sistemas de aquecimento ou arrefecimento das edificações.

Neste íterim surgem as estacas térmicas, caracterizadas por serem elementos estruturais de dupla finalidade construídos no subsolo para trocar calor entre uma edificação e a superfície enquanto também transferem cargas da estrutura para o solo. Trata-se de uma fundação profunda conectada conjuntamente e acoplada a uma bomba de calor equipada com um sistema de canalização, de modo que um fluido transportador de calor pode circular permitindo a troca de calor entre o solo e a estaca com a edificação. É parte de um GSHP com custos de operação e manutenção baixos, e com durabilidade e economia notórias. Figura 9.

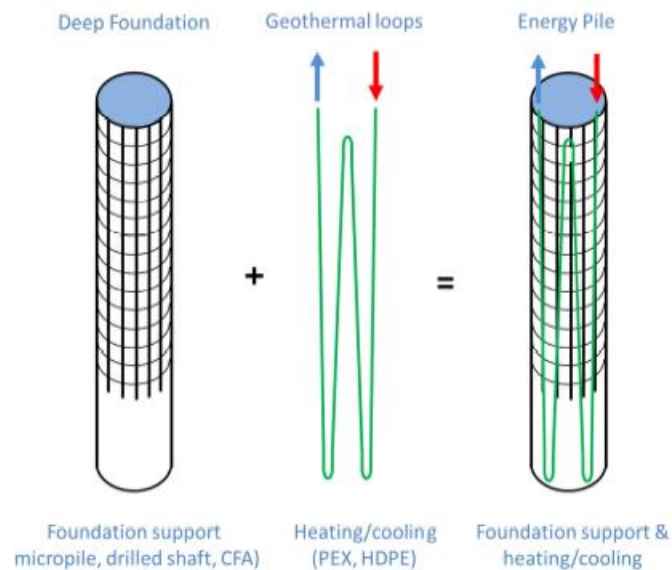


Figura 8- Estacas Térmicas –Elementos de Dupla finalidade (FONTE: Olgun & McCartney. 2014)

As estacas térmicas têm sido amplamente utilizadas em alguns países europeus, principalmente durante as últimas duas décadas. Esta técnica tem ganhado bastante espaço em aspecto da utilização de energias renováveis em cidades modernas e contribuído significativamente para a redução da emissão de HFCs.

A economia de energia e diminuição da emissão de CO₂ se fazem notórias quando se diz respeito a utilização de energia geotérmica e em especial estacas térmicas. A Tabela 2 mostra exemplos importantes desse sistema ao redor do mundo e sua respectiva produção de energia. Uma das obras com maior destaque em relação a produção de energia em MW/h.ano é o hospital de pessoas em Hyngzhou na China onde, segundo a *Enercret (Turney heating and cooling solutions)*, há uma economia de energia de cerca de 8260 MW/h.ano com aquecimento e 6740 MW/h.ano com

resfriamento, isso para pouco mais de 430 estaca térmicas foram instaladas em sua construção.

Tabela 2 - Exemplos de aplicação de estruturas termoativas (VT Nguyen, 2017)

Project	Country	Year	Energy (MWh/year)	Type of structure	Climate	References
Dock Midfield Zurich Terminal Airport	Switzerland	2003	1170 (cooling)	306 energy piles	Temperate	(Adam & Markiewicz, 2009; Pahud & Hubbuch, 2007)
Condominium Great morning, Einsiedeln	Switzerland	2011	262 (heating)	270 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
Lainzer Tunnel	Austria	2004	-	Heat exchanger anchors, Tunnel lining	Temperate	(Adam & Markiewicz, 2009; Pahud & Hubbuch, 2007;)
Uniq Tower, Vienna	Austria	2003	468 (heating) 530 (cooling)	7800 m ² diaphragm wall	Temperate	Data from www.enercnet.com
Vienna Metro line	Austria	-	-	Energy lining elements, floor slabs	Temperate	(Franzini & Pralle, 2011)
Hotel Sofitel, Vienna	Austria	2010	960 (heating) 600 (cooling)	100 energy piles and 253 m diaphragm wall	Temperate	Data from www.enercnet.com
STRABAG Headquarters, Vienna	Austria	2003	840 (heating) 1450 (cooling)	245 energy piles and 6000 m ² of floor plate layout	Temperate	Data from www.enercnet.com
Omega-Computers and Peripherals, Vienna	Austria	2012	104 (heating) 84 (cooling)	3100 m ² of floor plate layout	Temperate	Adapted from www.enercnet.com
Dalham Hall Stud, Newmarket	Great Britain	2008	288 (heating) 80 (cooling)	147 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
The Keble College, Oxford	Great Britain	2002	133 (heating)	83 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
Hospital Valle Belbo, Nizza Monferrato	Italia	2010	341 (heating) 318 (cooling)	450 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
European Central Bank, Frankfurt	Germany	2009	290 (heating) 176 (cooling)	72 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
Office Building Timber Port, Hamburg	Germany	2011	1170 (heating) 967 (cooling)	770 energy piles	Temperate	Data from www.enercnet.com
Financial Building, Wuxi	China	2011	4140 (heating) 5600 (cooling)	513 energy piles	Tropical monsoon	Data from www.enercnet.com
People's hospital, Yangzhou	China	2014	8260 (heating) 6740 (cooling)	434 energy piles	Tropical monsoon	Data from www.enercnet.com
Samsung Electronics, Seoul	Korea	1997	-	11150 m ² of floor plate layout	Temperate	Data from www.enercnet.com

2.3 - TRT (Teste de Resposta Térmica)

O comportamento geomecânico de uma estaca submetida a um gradiente térmico durante sua operação pode ser quantificado mediante realização de um Teste de Resposta Térmica (TRT) com a obtenção de parâmetros em um ensaio de carregamento térmico que efetivamente provocará deformações no elemento estrutural. Além disso, a condutividade térmica de um sistema estaca-solo é tipicamente quantificada utilizando esse teste, que envolve aquecer a estaca térmica sob uma taxa constante de transferência de calor e quantificar a mudança de temperatura com o tempo (Loveridge e Powrie, 2013). Vale ressaltar que o TRT foi desenvolvido basicamente para estudar a viabilidade do solo local para implantação do sistema. A obtenção das deformações e das temperaturas nas estacas são consequência.

Conforme citado em alguns estudos (Gehlin, 2012; Hamada et al., 2007; Lhendup et al. 2014; Zhang et al., 2014; Loveridge et al., 2012; e Loveridge et al. 2014), o TRT consiste no bombeamento de um fluido aquecido, por uma fonte de calor controlada na tubulação trocadora de calor no interior da estaca. A temperatura média do sistema para o determinado instante é determinada através da média das temperaturas de entrada e saída. É o método experimental mais comum utilizado para a determinação das propriedades térmicas do solo onde as estacas térmicas estão sendo construídas. Com ele são obtidos os parâmetros térmicos do solo utilizados continuamente no dimensionamento das estacas e dos sistemas como um todo. O ensaio pode ser feito na própria estaca, onde são obtidos os padrões de calor por metro que é transferido. A Figura 9 apresenta um esquema usual de set-up utilizado no TRT. De acordo com Zhang et al. (2012), o conhecimento das propriedades térmicas do solo é fundamental para um projeto adequado de um sistema trocador de calor que utiliza como fonte a energia geotérmica.

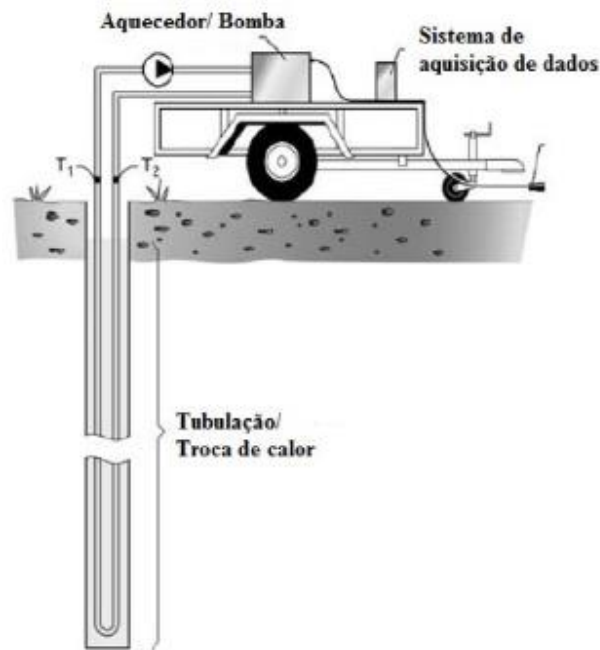


Figura 9 - Set-up usual do TRT (Gehlin, 2000)

Aspectos como diâmetro, comprimento e material da estaca, configuração da tubulação trocadora de calor são decisivos no resultado dos parâmetros citados no parágrafo anterior.

Como a Geologia não é algo uniforme e varia de local para local, conseqüentemente os parâmetros térmicos também sofrem variações, e avaliações in situ se fazem necessárias para que os projetos sejam realizados de forma mais exata. Inicialmente tais análises eram feitas com amostras retiradas do campo e levadas ao laboratório, a partir do teste da sonda-agulha, que consiste em inserir uma sonda muito pequena em uma amostra de solo corretamente armazenada e observar sua variação de temperatura com o tempo (LHENDUP et al 2014), porém os elevados custos, principalmente relativos a escavações, e a grande quantidade de amostras a serem analisadas nos grandes projetos tornavam muitas vezes a obtenção das propriedades térmicas em laboratório inviáveis economicamente (ECES 2013).

Por isso, o emprego do TRT torna-se mais viável e representa uma vantagem econômica, uma vez que é aplicado diretamente no local de implantação do sistema.

Antes que a fonte de calor seja efetivamente acionada, é necessário o bombeamento do fluido sem aquecimento por um período de 10 - 30 minutos (Zhang et al., 2014) para a estimativa da temperatura média do solo não perturbado. Esse é um importante parâmetro utilizado no cálculo da resistência térmica do sistema, logo, sua obtenção não pode ser negligenciada.

As primeiras horas de leitura das temperaturas durante o ensaio com a aplicação da carga térmica são descartadas, pois se trata de um período sob o efeito transiente e não são utilizados para a avaliação do valor da taxa média de transferência de calor. Gehlin (2012) recomenda um período de descarte entre 12 e 20 horas.

A duração do TRT deve ser suficiente para fornecer adequadamente os parâmetros térmicos do solo. O tempo de duração mínima do TRT ainda tem sido assunto de discussão, com recomendações que vão de 60 horas (Gehlin, 2012) a de 12 a 20 h (Smith e Perry, 1999). No entanto, Bier e Smith (2003) demonstraram em estudo analítico que o tempo mínimo pode variar significativamente dependendo das propriedades geométricas e térmicas do sistema trocador de calor.

Segundo Brandl (2006), sob fluxo turbulento o coeficiente de troca térmica é sempre superior comparado com o fluxo laminar, portanto algumas normas de energia geotérmica recomendam utilizar o fluxo turbulento no interior das tubulações. Porém, em regime de fluxo turbulento não é somente a velocidade de escoamento do fluido que interfere no valor do coeficiente de troca térmica, mas também a característica dos materiais, geometria, profundidade e fluxo de água subterrânea.

2.3.1 – Interpretação dos resultados obtidos no TRT

A taxa de transferência de calor (Q) é obtida através da equação 1, Sendo T_i a temperatura de entrada e T_o a temperatura de saída do fluido em ($^{\circ}\text{C}$):

$$\dot{Q} = C \cdot \dot{V}_m \cdot (T_i - T_o) \quad (1)$$

onde C representa o calor específico do fluido sendo igual a $4186.70 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ para água e \dot{V}_m a vazão em massa (kg/s).

Após obtenção da taxa média de transferência de calor (\dot{Q}), divide-se este pelo comprimento (H) da estaca para obtenção da taxa de transferência de calor por unidade do comprimento (q):

$$q = \dot{Q}/H \quad (2)$$

Seguindo na análise do TRT, a condutividade térmica (λ) pode ser calculada pela equação 3 com a utilização da média de temperatura na estaca medida entre os instantes t_1 e t_2 :

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{\bar{T}_2 - \bar{T}_1} \quad (3)$$

A inclinação (k) da regressão linear do gráfico não descartado citado no parágrafo anterior será utilizada na equação 4 uma vez que:

$$k = \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{\bar{T}_2 - \bar{T}_1} \quad (4)$$

De acordo com o Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011) uma das ferramentas para determinar os parâmetros do ensaio TRT é pela aproximação simplificada com base na teoria da fonte linear, sendo a mais utilizada devido a sua simplicidade e rapidez de análise. O teorema da fonte linear considera o poço ou à estaca como uma fonte de calor linear uniforme e infinita, com taxa de injeção de calor constante q (W/m). As mudanças de temperatura no solo ΔT (°C) com o tempo t (s), devido ao fluxo de calor aplicado durante o ensaio TRT podem ser determinadas pela Equação 4 (Carslaw e Jaeger, 1959 apud Loveridge, 2012).

Pela utilização da teoria da fonte linear infinita é possível calcular a temperatura a uma distância r da fonte de calor pela equação 5:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (5)$$

Na Equação 5 γ é uma constante de Euler e α é a difusividade térmica. Sendo:

$$\alpha = \lambda / \rho C \quad (6)$$

onde λ é a condutividade térmica, ρ é a densidade do solo e C é a capacidade térmica específica do solo.

Ainda pela teoria da fonte linear infinita obtém-se a resistência térmica (R_b) do furo de aplicação do sistema pela equação 7:

$$R_b = \frac{\Delta T}{Q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (7)$$

Onde q é a taxa de transferência de calor por unidade do comprimento da estaca e ΔT é a media da temperatura de entrada e de saída na estaca geotérmica no instante t_i

2.4 - Comportamento termomecânico

Mudanças de temperatura nas estacas térmicas podem levar a deformações que são capazes de induzir mudanças nas tensões axiais e devem ser consideradas para evitar comprometimento estrutural da mesma.

Vários estudos foram realizados acerca deste tema para investigação experimental do comportamento termomecânico de estacas térmicas (Laloui et al., 2006; Bourne-Webb et al., 2009; Murphy et al., 2013; Murphy & McCartney, 2014; Wang et al., 2014; Akrouch et al., 2014;) ou teste em escala menor em laboratório (Kalantidou et al., 2012; Ng et al., 2014; Stewart et al., 2014; Stewart & McCartney, 2013; Yavari et al.; Nguyen *et al.*, 2017). Os resultados evidenciaram os efeitos da variação de temperatura na interação solo-estaca e a resistência mobilizada das estacas.

Um dos primeiros testes termomecânicos abrangentes em uma estaca térmica foi relatado por Laloui et al. (2006), que avaliou a distribuição de temperatura e deformações em quatro diferentes tipos de solo. Foram observadas as respostas durante o aquecimento e resfriamento de um edifício em construção. Os resultados do experimento mostram que para um acréscimo de temperatura de 1°C, é esperado um aumento na a tensão axial térmica de 0.1 Mpa.

Amaya et al. (2012) descreveu os experimentos *in loco* realizados por Laloui et al (2006) e Bourne-web et al. (2009) e possibilitou um conhecimento mais profundo no âmbito dos efeitos da variação de temperatura no comportamento das estacas térmicas. Primeiramente para estimar a força axial devido ao carregamento mecânico e termomecânico, e a formulação analítica pode ser derivada da tensão total da estaca. Essa fórmula permite calcular separadamente os efeitos na estaca devido ao carregamento mecânico e térmico dada a seguir:

$$\varepsilon_{T-livre} = \alpha_c \cdot \Delta T \quad (8)$$

Onde $\varepsilon_{T livre}$ é a deformação térmica axial da estaca sem-restrição, ou seja, com condições de contorno livres e atrito na interface solo-estaca omitida; αc é o coeficiente de expansão térmica do concreto; ΔT é a variação de temperatura total na estaca.

No caso de nenhuma restrição na base e no topo da estaca, o carregamento aplicado é suportado principalmente pelo atrito lateral. Para a fase de resfriamento, a estaca contrai e as duas extremidades estão livres para se deformarem. O atrito mobilizado lateral previne em parte esse movimento e causa tensões térmicas devido à restrição. O atrito lateral mobilizado é considerado positivo acima da porção superior da estaca. Esse atrito lateral positivo tem a mesma direção do atrito induzido pelo carregamento mecânico no topo da estaca. Um atrito lateral negativo é observado na porção inferior. Opostamente quando a estaca é submetida a ciclos de aquecimento, está livre para se expandir nas duas extremidades e o atrito lateral mobilizado é positivo na parte superior e negativo na parte inferior, podendo ser observado na Figura 10.

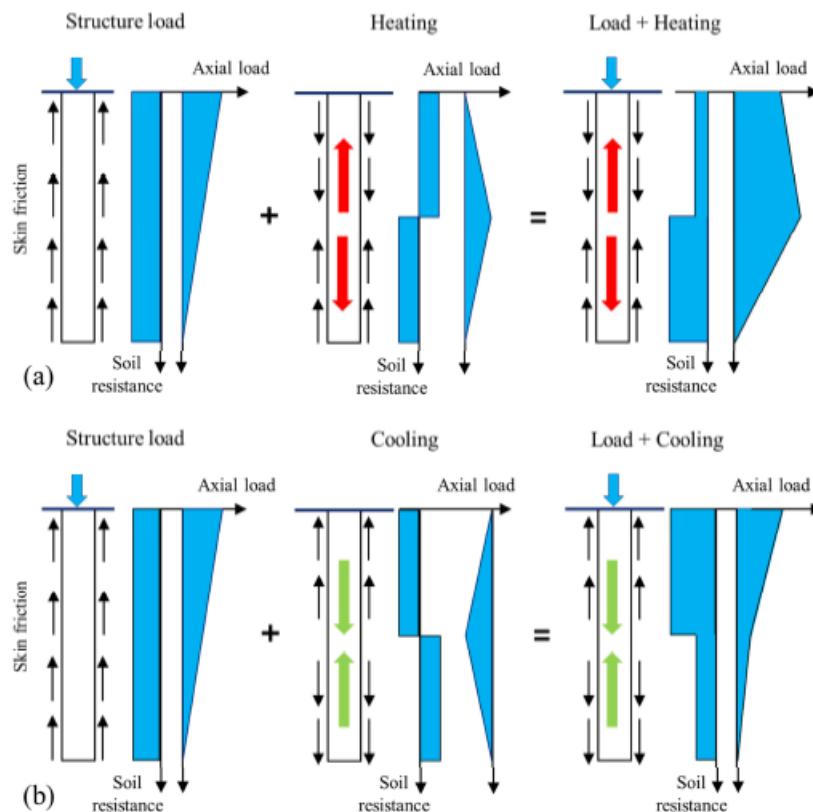


Figura 10 - Mecanismo de transferência de carregamento de uma estaca submetida a carregamento termomecânico; (a) aquecimento e (b) resfriamento sem restrição (adaptado de Bourne Webb et al., 2009)

No caso de estacas restritas em suas extremidades, a expansão ou contração axial durante os ciclos de aquecimento e resfriamento é restrita no topo e na base da estaca, levando a tensões axiais adicionais. Como resultado o estado de tensão-deformação da estaca é modificado dependendo da rigidez de ambas as extremidades restritas da estaca (Figura 11)

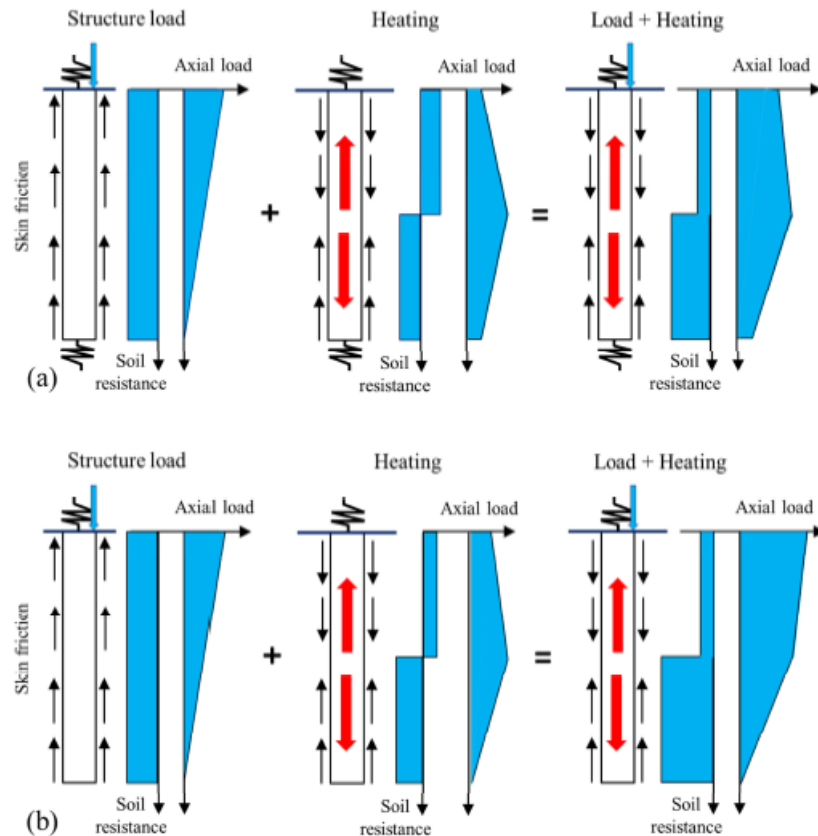


Figura 11 - Mecanismo de transferência de carregamento de uma estaca submetida a carregamento termomecânico; (a) Ambas as extremidades parcialmente restritas e (b) topo com restrição e base sem restrição (adaptado de Bourn Webb et al., 2009)

Como visto anteriormente, deformações em estacas livres diferem das estacas em condições restritas, para as condições de atrito na interface solo-estaca e quando há restrições no topo e na base da estaca, as estacas não são capazes de expandir ou contrair livremente e com isso a deformação observada ($\varepsilon_{T-observada}$) é, conseqüentemente menor do que a deformação encontrada na Equação 8, o que gera tensões adicionais que devem ser consideradas através da Equação 9.

$$\varepsilon_{T-observada} \leq \varepsilon_{T-livre} \quad (9)$$

A tensão (σ) e é dada pela lei de Hooke aplicada a materiais através da seguinte equação:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (10)$$

onde ε é deformação resultante entre a livre a restrita e E é o módulo de elasticidade do material.

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

2.5 –Comportamento do solo quando submetido a um carregamento térmico

Vários estudos recentes investigaram o impacto das mudanças de temperatura nas estacas térmicas. Foi bem estabelecido que as mudanças na temperatura das estacas podem gerar tensões adicionais, como mencionado anteriormente, estudos acerca da interação solo-estaca e solo-solo foram realizados por (McCartney and Rosemberg (2011); Di Donna et al (2016); Giuseppe et al, (2007); Goode e McCartney (2015); Behbehani e McCartney (2020), ponderando a interação concreto-argila, concreto-areia, areia-areia e argila-argila. Resultados consistentes foram encontrados e serão apresentados a seguir.

McCartney e Rosemberg (2011), realizaram ensaios em centrifuga geotécnica utilizando um modelo de curva carga-recalque, aquecendo a fundação à diferentes temperaturas e posteriormente aplicando carregamento mecânico. As curvas foram avaliadas e foram observadas as mudanças na resistência lateral com a mudança de temperatura. Os resultados mostrados na Figura 12 constatam então, que fundações aquecidas entre 15 a 60 °C e posteriormente carregadas axialmente apresentam um aumento na resistência lateral de 40% quando comparadas a fundações testadas a temperatura ambiente.

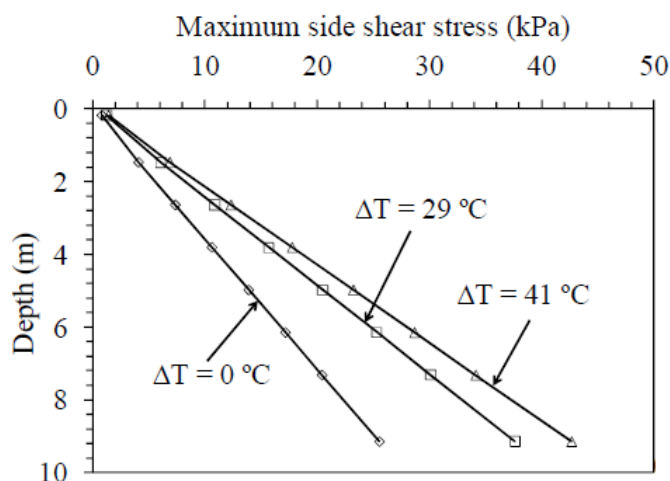


Figura 12 - Distribuição da resistência lateral versus profundidade (Adaptado de McCartney e Rosemberg, (2011))

Di Donna et al (2016) tiveram como objetivo investigar experimentalmente a resposta da interface solo-estaca em diferentes temperaturas, avaliando a mobilização de resistência lateral induzida pela deformação térmica da estaca e a influência direta das variações de temperatura no solo e no comportamento solo-estaca. Para esse estudo, um dispositivo de cisalhamento direto foi desenvolvido e calibrado. Foi constatado que a interface areia-concreto sofre influência dos carregamentos cíclicos, mas não sofre influência devido ao aumento de temperatura. Também se constatou um aumento na resistência lateral devido ao aquecimento. Por outro lado, a resposta da interface argila-concreto variou em diferentes temperaturas, mostrando um aumento de resistência com o aumento da temperatura, possivelmente devido aos efeitos da temperatura na deformação da argila.

Giuseppe et al, (2007) avaliou o efeito da interação areia-concreto e observou que, para carregamentos térmicos cíclicos ocorreu uma densificação do solo o que ocasionou um aumento na resistência ao cisalhamento durante os ciclos. Logo, os valores finais de resistência para uma superfície, dependem do grau de densificação da areia durante os ciclos.

Goode e McCartney (2015) realizaram testes adicionais que confirmaram essas tendências, enquanto Behbehani e McCartney (2020) descobriram que essas tendências eram devido a um aumento na tensão efetiva ao longo da estaca associado à secagem induzida termicamente da estaca térmica.

Assim, os efeitos da mudança de temperatura no solo ao redor da estaca podem aumentar a resistência ao cisalhamento na interface devido ao aquecimento, o que pode ser explicado pela consolidação térmica, no solo argiloso.

2.5.1 – Histerese

A histerese é a capacidade de preservar uma deformação efetuada por um estímulo, no caso das estacas térmicas a histerese se caracteriza pelas deformações residuais ao fim do processo de resfriamento, após um ciclo de aquecimento. É observada em casos onde deformações termoplásticas permanentes são observadas na interface solo-estaca.

Alguns estudos enfatizam esse processo, como por exemplo os realizados por Hueckel e Baldi (1990), onde constataram que o aquecimento gera taxas de deformação compressivas plásticas, enquanto o resfriamento implica apenas em deformação elástica. Um ciclo aquecimento-resfriamento resulta, por fim, a mudanças de volumes irreversíveis.

A histerese pode muitas vezes ser negligenciada por se tratar de uma taxa de deformação residual muito baixa quando comparada com a variação total do sistema e isso ocorre pois o atrito lateral mobilizado durante o processo de aquecimento não gera deformações plásticas na interface solo-estaca. Porém, existem casos em que as deformações são significativas e devem ser levadas em consideração durante o processo de dimensionamento.

Moradshahi et al. (2020) enfatizaram a influência do método construtivo da estaca térmica, principalmente em sua base. O caso investigado por eles foi um caso singular no qual acentuou que a restrição a deformação térmica é altamente controlada pela resistência lateral.

2.6 - Deslocamento no topo da Estaca

Quando estaca é submetida à ciclos de aquecimento, tende a se expandir podendo gerar levantamento em seu topo, contrariamente quando é resfriada recalques podem ser observados devido a sua contração.

Kalantidou et al. (2012) and Yavari et al (2014a) usaram modelagem física para estudar e quantificar o efeito da variação de temperatura no comportamento mecânico de estacas em areia seca. Os resultados mostram que, quando submetida a carregamento constante, o deslocamento no topo da estaca teve resposta termo

elástica ao trabalhar com carregamentos térmicos baixos (menores que 30% da resistência da estaca).

Durante os carregamentos térmicos, deslocamentos no topo da estaca se mostram similares à curva de expansão térmica do concreto. Quando submetido a carregamentos elevados no topo, a estaca apresenta recalque após os ciclos térmicos.

Yavari et al., (2016) testou o mesmo modelo de estaca nas mesmas condições, porém com argila saturada. Os resultados apresentam levantamento no topo da estaca observado durante o aquecimento e o recalque no processo de resfriamento subsequente. Deslocamentos irreversíveis termicamente induzidos foram observados após os ciclos de aquecimento/resfriamento sob a condição de carga constante no topo da estaca, inclusive na condição de baixos carregamentos no topo (20% da capacidade última da estaca). O deslocamento irreversível é maior devido a maiores carregamentos axiais. Os ciclos de carregamento e descarregamento relacionados com o deslocamento no topo da estaca podem ser observados na Figura 13.

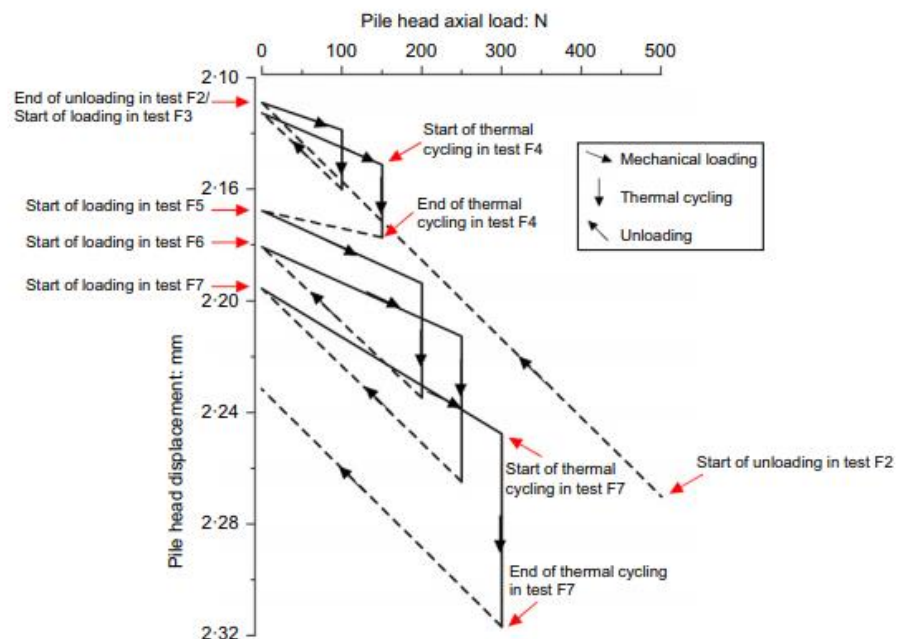


Figura 13 - Carregamento na estaca - Deslocamentos obtidos no topo da estaca devido a ciclos de carregamento termomecânico, (FONTE: Yavari et al, 2016a)

Para o topo livre, considerando as estacas usadas para o resfriamento da edificação, ocorre uma redução das forças axiais e um recalque adicional no topo. Devido a contração do material da estaca, o atrito lateral aumenta na parte superior e

diminui na parte inferior. Quando a estaca é usada para resfriar o ambiente, tem-se o aquecimento dos elementos de fundação, provocando a dilatação e resultando na elevação do topo da estaca.

A medição do deslocamento no topo da estaca se faz necessário, pois, a partir deste, são fornecidos subsídios para determinação do mecanismo de atrito lateral e deslocamento ao longo da estaca.

Para melhor compreensão, deve-se atentar a definição de ponto nulo que se trata do ponto que divide a estaca em relação ao seu deslocamento, ou seja é o ponto de deslocamento absoluto nulo, onde o aquecimento da estaca levará a expansão da mesma levando a deslocamentos relativos ascendentes acima do ponto nulo e descendentes abaixo do ponto nulo. Se a estaca fosse livre para se deslocar, sem a presença de solo circundante, homogênea e sem restrições em suas extremidades, o ponto nulo coincidiria com a cota média da estaca. Porém como as estacas geotérmicas estão embutidas no solo, o ponto nulo será diferente da cota média pois as deformações termicamente induzidas são influenciadas diretamente pelo solo circundante e pela condição de restrição das extremidades da estaca.

Segundo Knellwolf et al. (2011), para a condição de deslocamento absoluto nulo ser satisfeita, a soma das forças mobilizadas na seção acima do ponto nulo deve ser igual a soma das forças mobilizadas na seção inferior ao mesmo.

Vale ressaltar que de acordo com Laloui (2013), durante diferentes variações de temperatura a posição do ponto nulo permanece estacionária, logo durante o carregamento térmico o ponto nulo permanecerá na mesma posição durante a imposição de um gradiente de temperatura.

O ponto nulo pode ser determinado a partir das leituras de deformações térmicas determinando o deslocamento acumulado ($\delta_{T,i}$) dos pontos médios entre os extensômetros considerando deslocamento igual à zero no ponto nulo. O deslocamento pode ser calculado pela Equação 11:

$$\delta_{T,i} = \delta_{T,i-1} + \frac{1}{2}(\varepsilon_{T,i-1} + \varepsilon_{T,i})\Delta l \quad (11)$$

2.7 – Distribuições de temperatura no subsolo

O conhecimento da distribuição da temperatura no subsolo tem um papel importante no âmbito do dimensionamento de estacas térmicas. Solos com baixas temperaturas podem ser usados para resfriamento de estruturas enquanto solos com alta temperatura pode ser utilizados para resfriamento.

A troca de calor entre uma estaca térmica e o solo que a circunda pode ocorrer devido a três mecanismos: condução, convecção e radiação (Brandl 2006). A condução é o mecanismo predominante da troca de calor nos solos e depende dos contatos entre os grãos, tipicamente quantificados usando a densidade e o grau de saturação. A convecção é considerada nos casos de fluxo de água subterrânea e em solos não saturados. Os dois casos anteriores são relevantes em solos de alta permeabilidade, enquanto o último caso é relevante perto da superfície do solo, onde a difusão do vapor e a mudança da fase da água podem levar a grandes aumentos na transferência de calor (Catolico et al. 2016). Em depósitos de solo saturado de baixa permeabilidade, é tipicamente convencional considerar a condução como o principal modo de transferência de calor.

De acordo com Ress et al. (2000) convecção e radiação podem ter seus efeitos negligenciados quando se trata de regiões com pouca variação do nível do lençol freático. Segundo a GSHP Association (2012) a condução é o mecanismo mais importante de transferência de calor no subsolo e está diretamente ligada as propriedades térmicas dos constituintes do solo, do contato entre as partículas e do grau de saturação, predominante em solos secos. Alguns outros fatores podem influenciar as propriedades térmicas de um solo, como a mineralogia, principalmente, a quantidade de quartzo presente, o teor de umidade, conseqüentemente a saturação, a densidade e porosidade. (OROZCO, 2016).

2.8 - Propriedades térmicas do solo

Em aplicações geotécnicas se faz necessário o conhecimento vasto das propriedades do solo. No âmbito da utilização de energia geotérmica as propriedades térmicas do solo determinantes para eficiência do sistema são a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica. A Tabela 3 mostra a variação de tais

propriedades para vários tipos de solo de acordo com Lhendup (2014). Esses valores são governados pela estrutura e propriedades físicas do solo.

Tabela 3 - Propriedades térmicas médias do solo (Lhendup, 2014).

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade calorífica vol. (KJ/m ³ K)
Pedregulho	2,0-3,3	2200 - 2700
Areia	1,5 -2,5	2500 - 3000
Silte	2,4 – 2,0	2500 - 3100
Argila	0,9 – 1,8	2200 - 3200
Argilito	2,6 – 3,1	2340 - 2350
Arenito	3,1 – 4,3	2190 - 2200

Segundo Riederer et al., (2007) a condutividade térmica depende da densidade e umidade do solo, sendo que em solos saturados pode apresentar valores até cinco vezes maiores quando comparados a solos não saturados. A capacidade calorífica volumétrica também depende da presença de água e ar nos vazios do solo. Neste ínterim se faz necessário o entendimento da influência do grau de saturação do solo na condutividade térmica. Akrouch (2012) realizou estudos acerca da variação térmica em solos não saturados, comparando resultados de ensaios prévios encontrados na literatura com valores experimentais e constatou que a condutividade térmica em estacas térmicas é influenciada diretamente pelo estado de saturação do solo circundante à estaca. Na Figura 14 abaixo se faz nítido a percepção de tal influência. Valores de condutividade térmica calculados e experimentais foram normalizados e plotados versus o grau de saturação. Akrouch (2012) também relatou que a performance das estacas térmicas pode cair cerca de 40% em solos com um grau de saturação muito baixo.

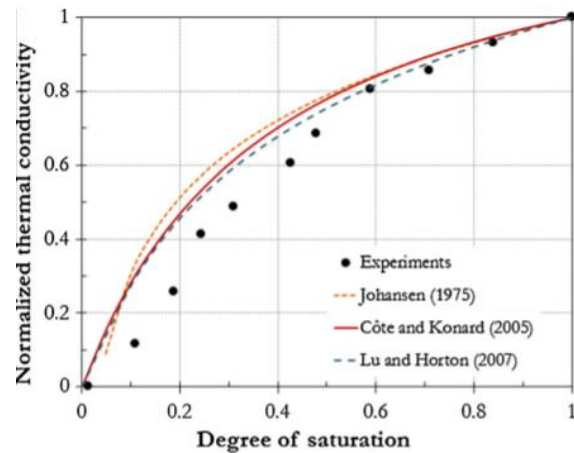


Figura 14 - Valores experimentais e calculados de condutividade térmica normalizada versus grau de saturação. (Adaptado de Akrouch, 2012)

Similarmente, estudos envolvendo solos não saturados foram realizados por Yun & Santamarina (2008) e, segundo ele, a porosidade é o parâmetro em pequena escala mais importante quando se diz respeito ao solo nessa condição. A Figura 15 evidencia que a condutividade térmica de um solo não saturado decresce linearmente com o aumento na porosidade. Segundo Mattson et al., (2008) solos não saturados com valores de condutividade térmica baixos podem fazer necessários o uso de estacas mais profundas ou com maior área de contato com o solo.

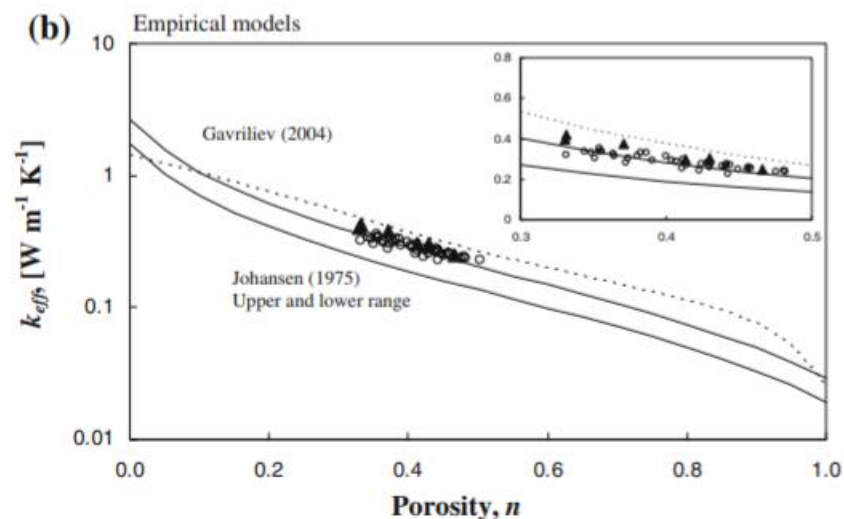


Figura 15 -Variação da condutividade térmica com a porosidade para solos não saturados (FONTE: Yun & Santamarina, 2008)

Vale ressaltar que em solos com existência de fluxo de água, o efeito da condutividade térmica contribui para acelerar o processo de troca de calor com o subsolo e afeta diretamente a operação do GSHP.

Choi et al., (2011) realizou estudos relacionando a taxa de transferência de calor com a variação do nível d'água. A Figura 16 mostra a relação da taxa de transferência de calor de acordo com a variação do NA e consequentemente a saturação do solo. onde a relação $\frac{h}{L} = 1,00$ representa um solo 100% saturado.

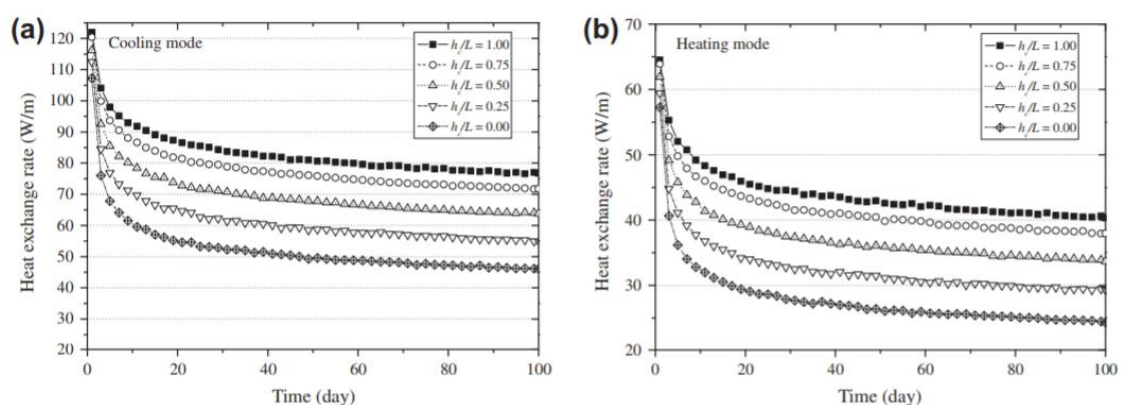


Figura 16 - Taxa de transferência de calor (a) Resfriamento e (b) Aquecimento (FONTE: Choir, 2011)

Outro parâmetro importante é a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica representada pela difusividade térmica que representa a rapidez com que o solo muda de temperatura quando submetido a variações de temperatura. Um alto valor de difusividade significa que o solo reterá energia por pouco tempo, ou seja, trocará de temperatura com maior rapidez e, ao contrário, se ele possuir baixa difusividade, ele demorará mais a mudar de temperatura e reterá energia por mais tempo.

2.9 – Histórico de ensaios em estaca geotérmica no Brasil

Com a popularização do uso de sistemas de climatização geotérmica a nível mundial, cada vez mais projetos passaram a ser executados utilizando estacas térmicas. Ainda não possuem relatos da utilização de energia geotérmica em projetos Brasileiros, provavelmente por se tratar de uma tecnologia nova e ainda pouco

difundida no que diz respeito a sua aplicação em solos tropicais. Entretanto, estudos acerca desse tema vêm sendo realizados desde 2014 por pesquisadores dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

O primeiro TRT (Teste de resposta térmica) realizado em solo Brasileiro foi executado por Brandeira Neto (2015) em São Paulo na cidade de São Carlos. O ensaio foi realizado em uma estaca escavada com profundidade de 12m de diâmetro de 25mm, com sistema U simples e U duplo determinando a condutividade térmica do solo.

Morais e Tshua (2016) realizaram ensaios acerca da distribuição da temperatura ao longo da profundidade do solo, encontrado valores aproximadamente constantes partir de 3 a 5 metros de profundidade.

Morais (2017) realizou ensaios em uma estaca do tipo raiz, com diâmetro de 35 cm e profundidade de 15 m na cidade de São Carlos – SP.

Sousa (2017) realizou estudos acerca da utilização de estacas geotérmicas em solo tropical não saturado em Brasília – DF avaliando a eficiência térmica de diferentes configurações de grupos de estacas, através de simulação numérica. Foram utilizadas estacas com diâmetros de 30, 40 e 60 cm com diferentes configurações e, concluiu-se que, para a máxima eficiência, dentro dos diâmetros e configurações estudados, as estacas com diâmetro de 60 cm e três voltas na tubulação apresentam resultados mais satisfatórios.

2.9.1 – Histórico de ensaios em estaca geotérmica da UENF

A Universidade Estadual do Norte Fluminense- Darcy Ribeiro (UENF), localizada na cidade de Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro possui um campo experimental com uma estaca geotérmica de 12 metros de comprimento e 40 cm de diâmetro, na qual três ensaios foram realizados por Ferreira (2017). Obtendo valores de condutividade térmica de 2,15, 2,41 e 2,59 W/mK em cada ensaio respectivamente.

Os resultados comparativos entre os ensaios realizados em solo brasileiro estão resumidos na Tabela 4. Vale ressaltar que apenas os resultados de um TRT serão expressos para os trabalhos de Moraes (2017) e Ferreira (2017).

Segundo o Eurocode (CEN 341 N525 2011), valores superiores a 1,7 W/mK de condutividade térmica são considerados adequados para aplicação de estacas geotérmica. Por conseguinte, estudos realizados até o presente momento em solo brasileiro representam potencial notório de utilização de energia geotérmica para climatização de ambientes.

Tabela 4 - Síntese do Teste de Resposta Térmica (TRT) realizados no Brasil.

Autor	Localização	Tipo da estaca	Diâmetro da estaca (mm)	Comprimento da estaca (m)	NA	vazão (l/min)	Duração (horas)	Condutividade Térmica (W/mK)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)	Resistência Térmica Média (mKW)
Bandeira Neto (2015)	São Carlos - SP	Estaca escavada	25	12	11,5	17,4	72	3,1	101	0,12
Ferreira (2017)	Campos dos Goytacazes - RJ	Estaca Raiz	40	12	5,45	15	150	2,59	45,99	0,3
Morais (2017)	São Carlos - SP	Estaca Raiz	35	15	1,5	-	-	2,44	-	0,12

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Perfil do solo

O solo que circunda a estaca térmica é de fundamental importância para posterior avaliação dos resultados e comportamento durante os ciclos de aquecimento, portando uma sondagem (SPT1) em junho de 2017 foi executada em um ponto próximo à estaca, representada no anexo A. Através da análise conjuntada sondagem com o perfil longitudinal do solo evidenciado na

Figura 17 pode-se observar que nas profundidades entre 3 e 4 metros aproximadamente, há presença de argila com frações de silte e areia e que nas profundidades entre 9 e 11 metros há argila marinha muito mole. Nas outras camadas a presença predominante é de solo arenoso.

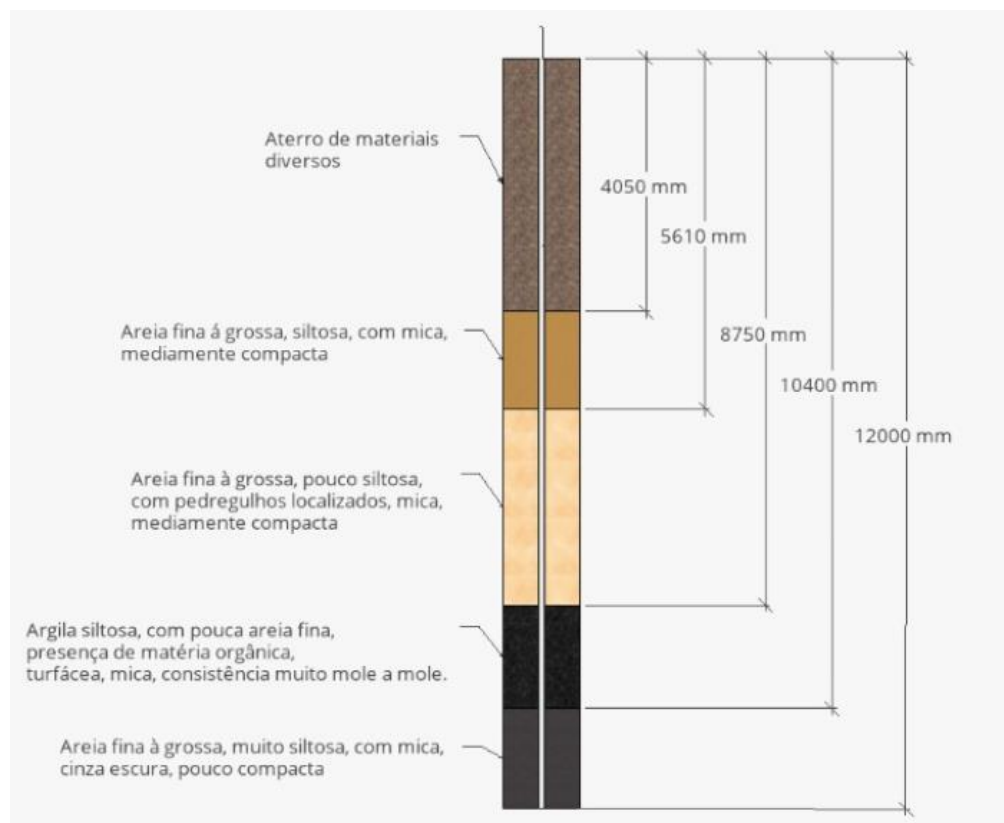


Figura 17 - Perfil longitudinal do solo

Com a proximidade do campo experimental ao rio Paraíba do Sul, o nível do lençol Freático sofre grande influência das variações do nível do rio ao decorrer do ano. Por conseguinte, se faz imprescindível a verificação da flutuação durante o

período do ensaio. Para a instalação do nível d'água (N.A.), foi realizado um furo por meio de trado manual de diâmetro nominal de 100 mm até 6,75 m de profundidade. Em seguida foi introduzido no interior do furo um tubo de PVC de 50 mm diâmetro, todo perfurado e revestido com tela de 2,00 mm.

3.2 – Montagem do ensaio

Como mencionado previamente, três ensaios foram realizados anteriormente por Ferreira (2017). Para o presente trabalho foram realizados três testes de resposta térmica (TRT) em uma estaca térmica de concreto localizada no campus da UENF, nas intermediações do prédio da Centrífuga Geotécnica. A Figura 18 indica a exata localização da estaca ($21^{\circ}45'38.4S$, $41^{\circ}17'34.2'' W$).

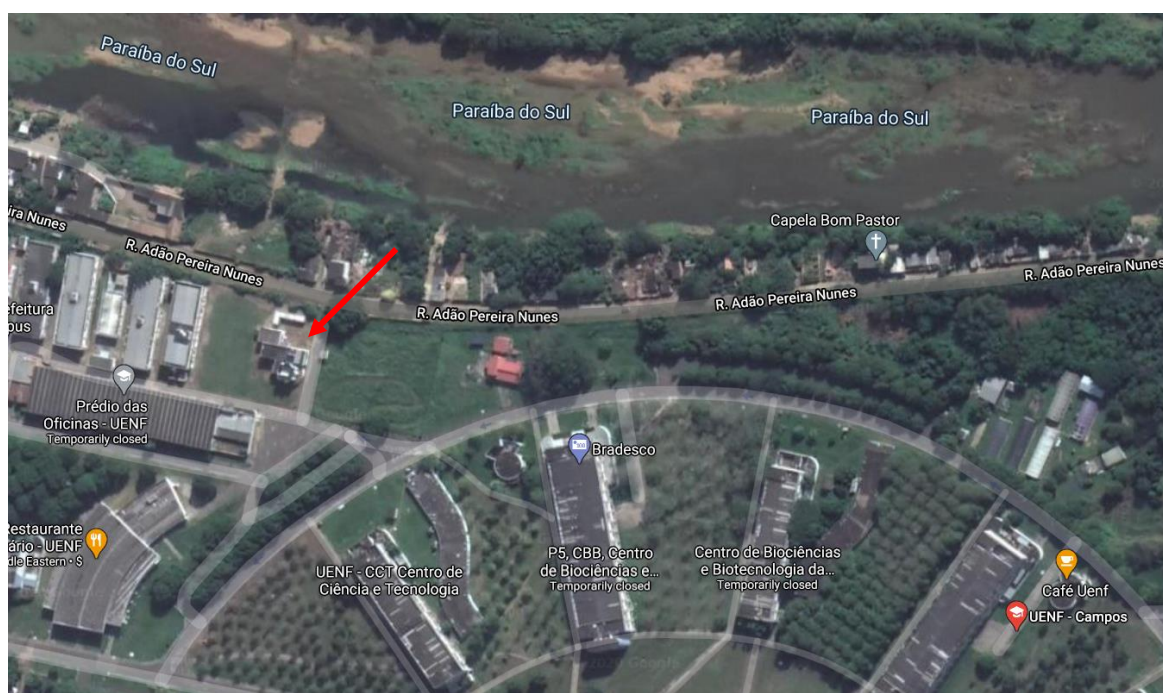


Figura 18 - Identificação da localização da estaca térmica (FONTE: Google Earth)

A estaca é do tipo escavada, possui diâmetro de 400mm, comprimento de 12m e possui instalado um tubo PEX-A monocamada em U simples, com diâmetro externo de 25mm e 2,3mm de espessura resistente a altas pressões e temperaturas segundo a norma UNE-EM ISSO 12875. A Figura 19 detalha o tubo PEX já preso à armadura da estaca onde o detalhe da conexão entre a tubulação de entrada e de saída da estaca foi feita com dois Joelhos de 90°.



Figura 19 - Tubo PEX trocador de calor em forma de "U" preso a armadura da estaca.

De acordo com Ferreira (2017), O concreto utilizado na estaca foi alto adensável com brita 0 como agregado graúdo. O concreto passou por ensaio de compressão axial e diametral. Obtendo-se resistência a compressão de 29,6 MPa, módulo de elasticidade de 18 GPa e resistência a tração de 3,4 MPa.

No âmbito do monitoramento das deformações e temperaturas em diferentes pontos da estaca durante a imposição de um gradiente de temperatura, esta foi instrumentada com strain gauges da marca Geokon. A Figura 22 detalha a instalação ao longo da estaca.

A instalação do strain gauges modelo 4150 foi realizada no aço operando pelo princípio da corda vibrante, sendo dispostos verticalmente, como mostrado na Figura 20. O processo de instalação dos extensômetros na armadura é mostrado na Figura 21.



Figura 20 - Disposição, nomenclatura e profundidade dos sensores na estaca térmica.



Figura 21 - Strain Gauge instalado na armadura

Os strain gauges estão conectados em um quadro de medições da marca Geokon detalhado nas Figura 22 e Figura 23. Os dados de deformação e temperaturas ao longo da estaca foram adquiridos em intervalos de 10 segundos e armazenados através do software LOGVIEW, também da marca Geokon que permite a aquisição dos dados de temperatura e deformação para cada sensor ao mesmo tempo. A coleta dos dados foi realizada ao fim de cada dia de ensaio.

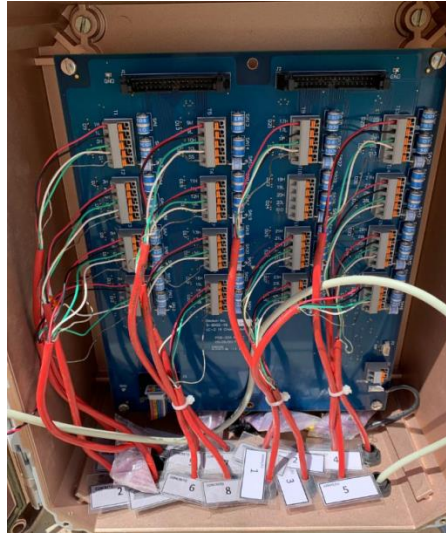


Figura 22 - Detalhamento do quadro de medição dos extensômetros e termopares

Uma fonte de alimentação externa de 12v foi estabelecida, além de um aterramento específico para esse sistema, ambos sugeridos pelo fabricante.



Figura 23 - Detalhamento do quadro de medições e do aterramento.

Foi confeccionado um equipamento para quantificação do deslocamento total ocorrido no topo da estaca, quando a mesma é submetida a um gradiente de temperatura. Esse mecanismo é composto por uma viga de referência (perfil estrutural de alumínio) cujas extremidades são apoiadas em uma haste rosqueada permitindo alteração da altura da viga, se necessário.

Para a execução desse projeto, foi utilizado um perfil estrutural de alumínio como viga de referência. O perfil possui dimensão 40x40mm, apresentado na Figura 24, permitindo ampla trabalhabilidade devido a sua seção transversal, não possuindo a necessidade de perfuração para sua fixação sem alteração em sua rigidez.



Figura 24 - Perfil estrutural de alumínio.

O perfil estrutural de alumínio teve suas extremidades apoiadas em uma peça de aço inox, confeccionada especialmente para essa finalidade. A peça mostrada na Figura 25 possui um orifício circular que permite o perfeito encaixe na barra rosqueada. A seção retangular foi executada com a finalidade de junção do perfil estrutural à peça de aço através de parafusos.



Figura 25 - Peça de aço inox

Barras rosqueadas de 1" $\frac{1}{2}$ de diâmetro e comprimento máximo de 1 metro foram utilizadas para o apoio da viga de referência e da peça de aço inox. Duas porcas foram soldadas para exercer a ligação entre duas barras, garantindo que ficassem dispostas no solo na profundidade de aproximadamente 1 metro e que remanescessem 1 metro acima do nível do terreno permitindo a variação da altura da viga de referência conforme o necessário (Figura 26). Posteriormente as barras foram

concretadas a fim de assegurar maior estabilidade ao experimento e minimizar qualquer tipo de vibração externa.



Figura 26 - Esquema das Barras rosqueadas presas por Porcas Soldadas

Para garantir uma medição precisa do deslocamento no topo da estaca, foram instalados dois Transdutores de Deslocamento Linear da marca GEFRAN, modelo PY2, com resistência de 5k ohm e curso útil de 50 mm (Figura 27). Os referidos transdutores trabalham medindo a posição linear e o deslocamento linear. O último consiste no movimento de um corpo em uma única direção ao longo de um eixo, neste caso, o movimento vertical da estaca.

Os dados de saída do transdutor de deslocamento linear são os valores computados de deslocamento no topo da estaca em unidade de milímetros (mm). Podendo assumir valores positivos ou negativos de acordo com o referencial adotado

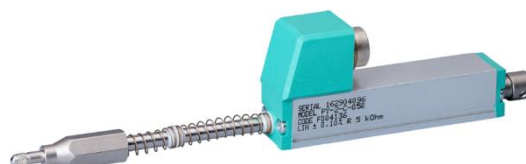


Figura 27 - Transdutor de Deslocamento Linear - PY2. (FONTE: Gefran)

Os transdutores foram instalados no topo da viga de referência (SD Viga topo) e na cabeça da estaca (SD Cabeça Estaca) dispostos de maneira a trabalhar com metade do curso (25mm), a fim de quantificar tanto valores de compressão quanto de extensão do mesmo.

Ao ser submetida a um gradiente de temperatura, a estaca se expande comprimindo o SD estaca topo. Neste caso, apresenta um valor negativo. Ao mesmo tempo o SD viga base tende a se expandir, apresentando um valor positivo. Um esquema da montagem do ensaio é representado na Figura 28, uma visão da disposição dos equipamentos in loco pode ser observada na Figura 29.

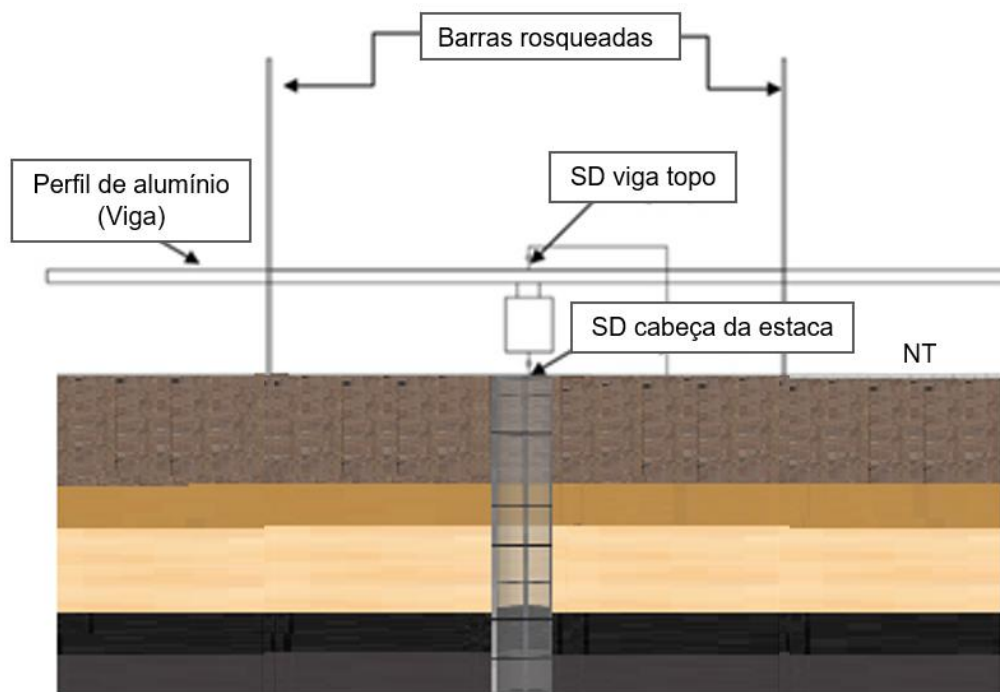


Figura 28 - Esquema de instalação dos Transdutores de Deslocamento Linear



Figura 29 - Disposição dos equipamentos in loco.

A viga de suporte foi fixada na barra rosqueada por dois modelos de apoio:

- Apoio fixo: permitindo somente deslocamento vertical da viga com o aquecimento;
- Apoio Móvel: permitindo deslocamentos verticais e horizontais.

No primeiro apoio a viga foi parafusada como mostrado na Figura 30, restringindo os deslocamentos horizontais onde a viga estava livre para se deslocar somente verticalmente em relação ao topo da estaca;



Figura 30 - Viga de referência com apoio fixo

Para garantir o funcionamento do apoio móvel, foi desenvolvida uma peça de champoxy (Figura 31), a base da peça foi lubrificada para minimizar o atrito. Após a realização os ensaios com a viga com apoio fixo, foi trocado o apoio sem interferência

viga, não alterando o referencial adotado. Esse sistema possibilitou contabilizar a diferença de deslocamento na viga com as duas situações de apoio. [

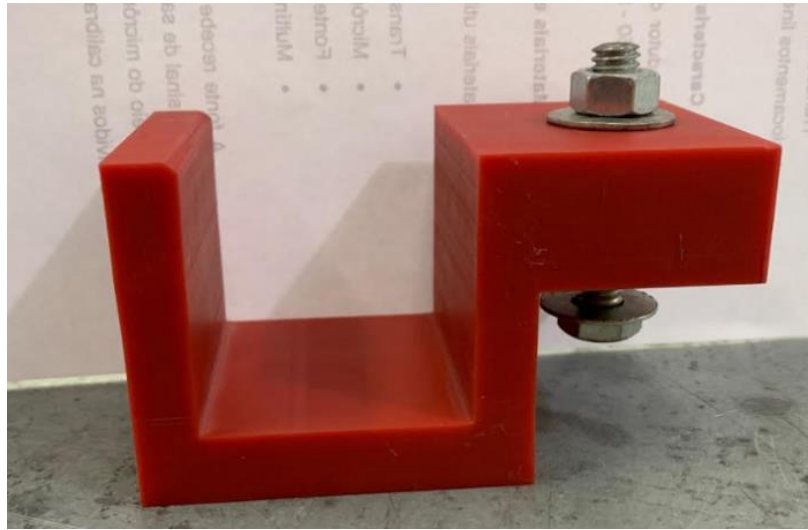


Figura 31 - Peça de champoxy desenvolvida para o sistema de apoio móvel.



Figura 32 - Viga de referência com apoio móvel.

O restante do conjunto para a realização do TRT (Thermal Response Test) foi então preparado. As tubulações de entrada e de saída da estaca foram ligadas a um tanque, onde a água foi aquecida por uma resistência de imersão com potência de 1,3 kW nos primeiros 2 ensaios e 3,0 kW no terceiro ensaio. O tanque utilizado possui diâmetro de 1,20 m e altura de 50 cm e foi colocada água até o nível de 21 cm no

ensaio, altura suficiente para imergir totalmente a resistência, totalizando um volume de 237 litros de água.

Um medidor de vazão digita IFP 2000 SERIES digital fabricado pela empresa Ômega fixado na tubulação de entrada da estaca e saída do tanque, teve a finalidade de garantir que o regime de escoamento turbulento, como é prescrito pela norma europeia e pela literatura. Para permitir o fluxo de água no interior da tubulação trocadora de calor, foi utilizada uma bomba centrífuga de $\frac{1}{4}$ CV de potência, Modelo CP-4R e fabricada pela DANCOR S.

Com o objetivo de garantir o mínimo de interferência da temperatura ambiente, as tubulações trocadoras de calor foram envoltas por uma fita de PVC (policloreto de vinilo) e o tanque envolto por placas de isopor. Ambos reduziram a troca de calor do fluido (água) com o meio externo, garantindo uma maior eficiência no sistema (Figura 33).



Figura 33 - Tanque isolado termicamente.

A Figura 34 mostra a disposição final dos equipamentos montados e preparados para a execução do ensaio.



Figura 34- Disposição final dos equipamentos para o ensaio.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

No projeto desempenhado nessa dissertação, o gradiente de temperatura imposto na estaca, assim como as deformações foram registrados em intervalos de 10 segundos, por meio do uso do programa LABVIEW, onde termopares instalados na entrada e saída da tubulação trocadora de calor foram levados para uma sala de controle e conectados a ele. O nível do lençol freático também foi monitorado durante a realização dos ensaios. Foram realizados 3 ensaios e três análises paralelas, as propriedades térmicas do solo, o comportamento termomecânico do sistema, e o deslocamento no topo da estaca, todas serão sintetizadas a seguir:

4.1 -Flutuação do nível do lençol freático

Como mencionado no capítulo 3, foram realizadas medições constantes do

Nível d'água durante todos os ensaios. A variação do nível do lençol freático foi monitorada. Durante a realização do TRT#2, uma precipitação considerável foi observada ocasionando grande variação do nível do lençol freático neste ensaio.

Principalmente devido à proximidade do campo experimental com as margens do rio

Paraíba do sul. O resultado desse monitoramento é apresentado na

Figura 35. Posteriormente será apresentado a influência da variação do Nível do Lençol freático na condutividade térmica do solo em estudo.

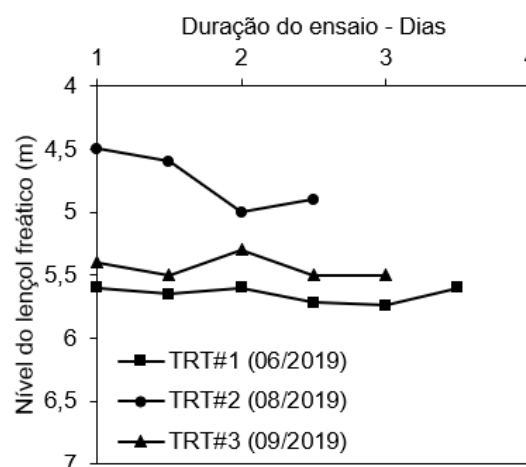


Figura 35 - Variação do nível d'água no Campos experimental da UENF – Campos dos Goytacazes.

4.2 Comportamento térmico do solo

4.2.1 – TRT#1 – Comportamento Térmico

O primeiro ensaio (TRT#1) teve duração total de aproximadamente 75 horas e foi finalizado após a estabilização das leituras de temperatura e deformação do sistema. A vazão aplicada ao sistema foi de 8,1 GPM, convertida para vazão em massa obteve-se 0,51 kg/s. A potência de aquecimento empregada foi de 1300W.

Nos primeiros 30 minutos do ensaio, a bomba de circulação foi ligada e a fonte térmica utilizada no aquecimento da água estava desligada de modo a permitir a obtenção da temperatura média inicial do solo sem perturbação. Essa temperatura é resultado da média das temperaturas do fluido de entrada e de saída na estaca térmica registradas pelos transdutores de temperatura. A temperatura média inicial do solo registrada foi de 26,34°C, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Temperatura do solo não perturbado – TRT#1

Tempo (min)	Thermistor In (°C)	Thermistor Out (°C)
0	26.25	26.40
2	26.25	26.41
4	26.27	26.41
6	26.27	26.41
8	26.26	26.41
10	26.27	26.41
12	26.25	26.41
14	26.27	26.41
16	26.27	26.41
18	26.27	26.41
20	26.27	26.41
22	26.27	26.42
24	26.27	26.42
26	26.27	26.41
28	26.27	26.41
30	26.28	26.41
média	26.34	

A Figura 36 mostra a variação de temperatura do fluido na entrada e na saída da tubulação trocadora de calor da estaca. A variação de temperatura ambiente

registradas é representada na Figura 36. Ambas foram adquiridas pelo sistema PXI durante todo o ensaio, com intervalos de 10 segundos.

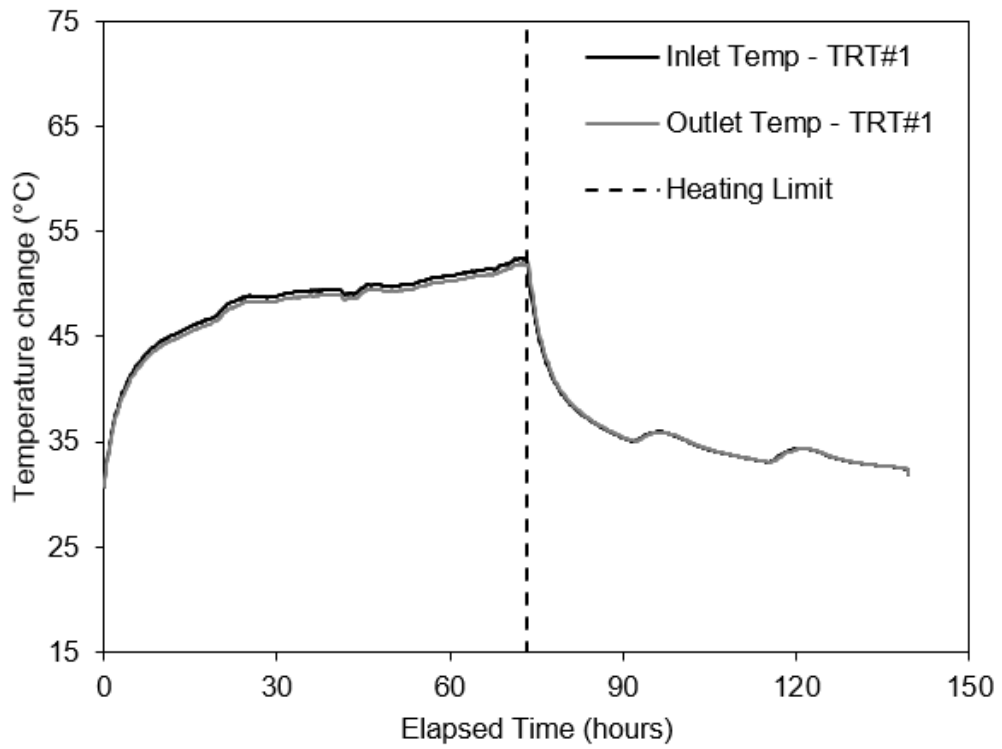


Figura 36 - Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#1

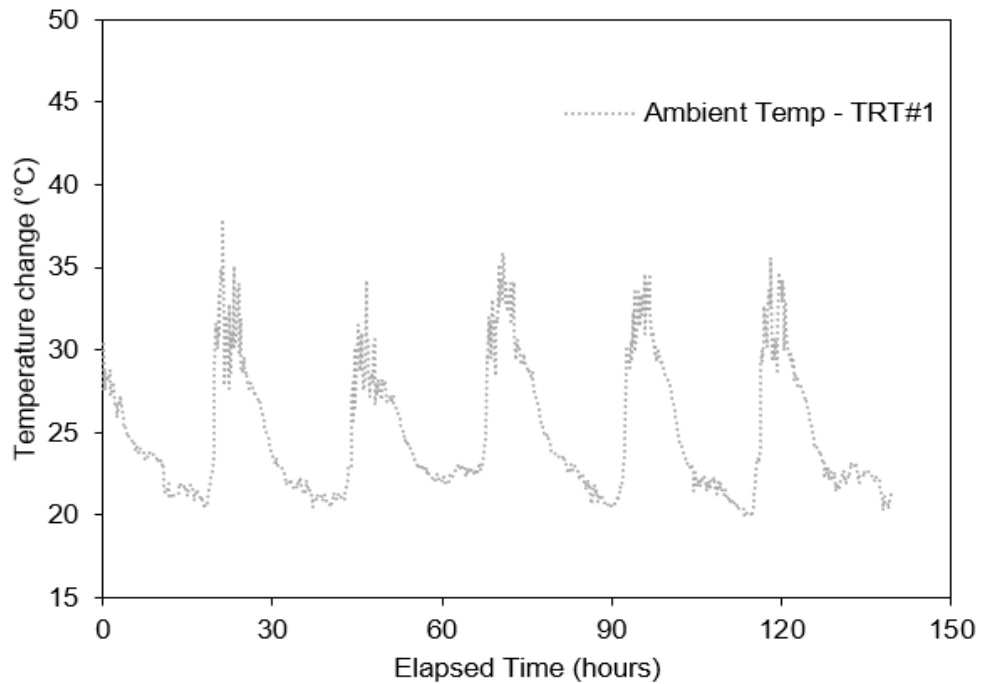


Figura 37- Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido – TRT#1

A partir do registro de temperatura de entrada e saída da estaca geotérmica foi quantificado o calor depositado no sistema durante o ensaio com a utilização da equação 1 (Figura 38).

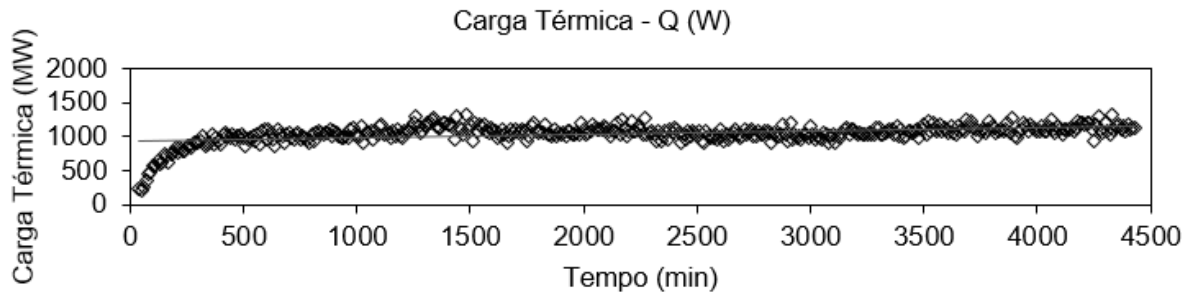


Figura 38 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio – TRT#1

Para a determinação da quantidade média de calor depositado no sistema as primeiras horas devem ser desconsideradas por se tratar de um período transiente. Conforme citado anteriormente, Gehlin (2012) recomenda um descarte entre 12 e 20h. Além da recomendação é possível notar na Figura 38 o período inicial de aumento expressivo das temperaturas de entrada e saída e da carga térmica. O tempo de descarte definido de acordo com a recomendação foi de 20h, resultado na Figura 39. A quantidade média de calor obtida foi de 1083.68 W e a quantidade média de calor por metro do comprimento da estaca foi de 90.307 W/m.

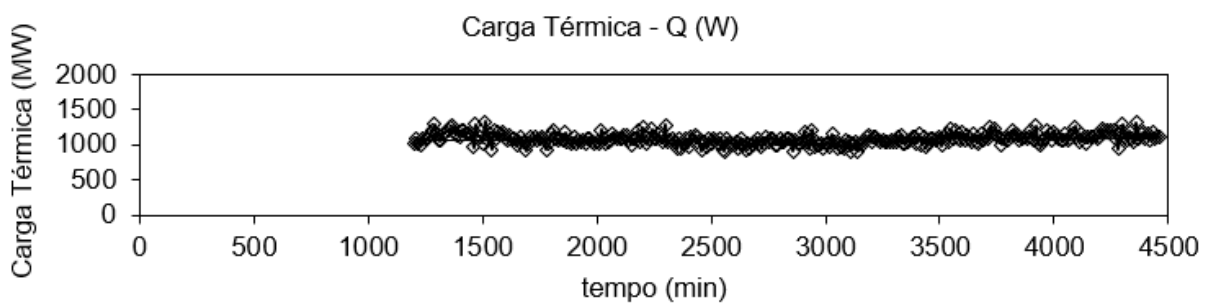


Figura 39 - Carga térmica real depositada no ensaio – TRT#1

A Figura 40 mostra a média da temperatura de entrada (T_i) e a temperatura de saída (T_o) do fluido em (K) pelo logaritmo natural do tempo em segundos. Utilizando um tempo de descarte de 20 horas o valor da inclinação (k) da regressão linear encontrada é de 3.5796.

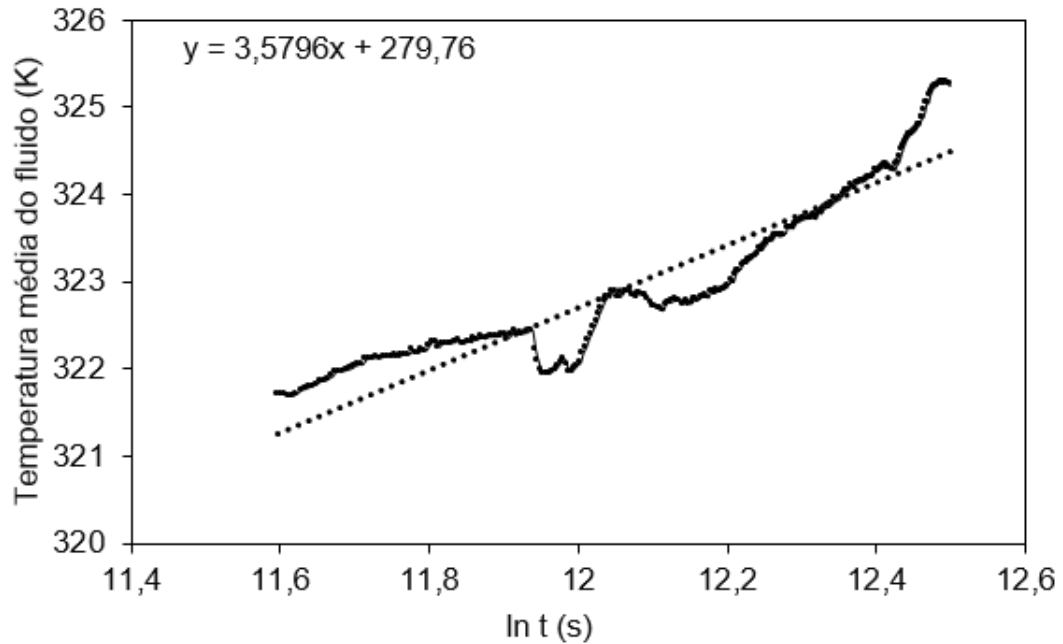


Figura 40 - temperatura do fluido x ln t (s) – TRT#1.

Uma vez obtida a inclinação (k) o valor da condutividade térmica (λ) média obtida através da equação 3 foi igual a 2.96W/m.K. A difusividade térmica (α) foi posteriormente calculada pela equação 5 e o valor obtido foi de $1,9 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

4.2.2 – TRT #2 – Comportamento Térmico

O segundo (TRT#2) foi realizado da mesma forma do TRT#1, porém, ocorreu um problema técnico na resistência de imersão, fazendo com que o teste tivesse uma duração menor quando comparado aos outros. O segundo ensaio (TRT#2) teve duração total de aproximadamente 50 horas. A vazão aplicada ao sistema foi de 5,1 GPM, convertida para vazão em massa obteve-se 0,323 kg/s. A potência de aquecimento empregada foi de 1300W.

Como no primeiro ensaio, houve a determinação da temperatura média inicial do solo não perturbado pela medição dos primeiros 30 minutos de ensaio com a bomba ligada e resistência térmica desligada. A temperatura média inicial do solo registrada foi de $27,91^\circ\text{C}$, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Temperatura do solo não perturbado TRT#2

Tempo (min)	Thermistor In (°C)	Thermistor Out (°C)
0	27,40	28,01
2	27,46	28,02
4	27,47	28,05
6	27,50	28,07
8	27,50	28,10
10	27,55	28,11
12	27,57	28,16
14	27,62	28,20
16	27,63	28,23
18	27,64	28,19
20	27,68	28,25
22	27,69	28,30
24	27,71	28,34
26	27,76	28,34
28	27,73	28,39
30	27,82	28,42
média		27,91

A Figura 41 mostra a variação de temperatura do fluido na entrada e na saída da tubulação trocadora de calor da estaca. A variação de temperatura ambiente registrada é representada na Figura 42.

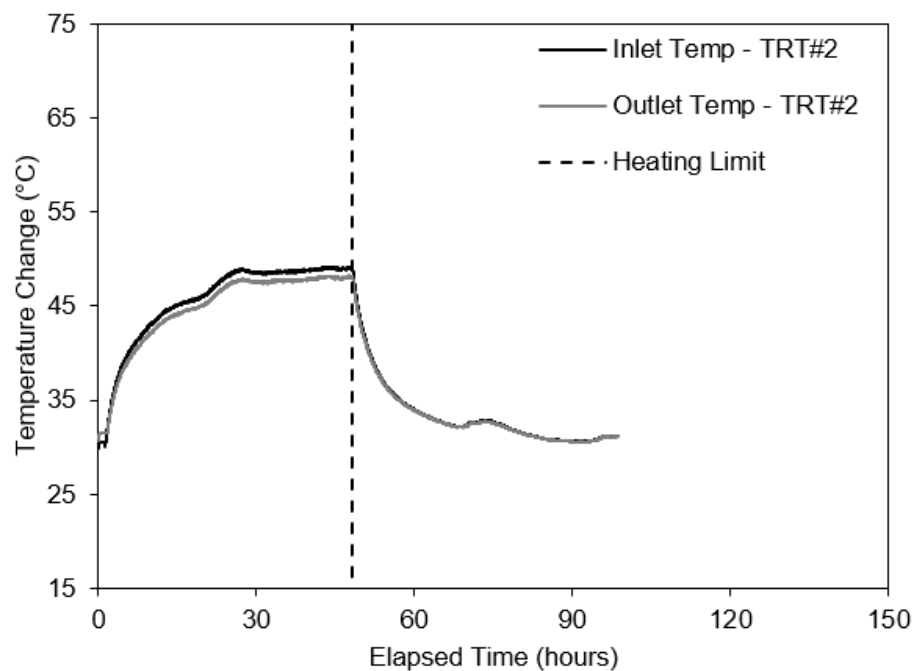


Figura 41 -Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#2

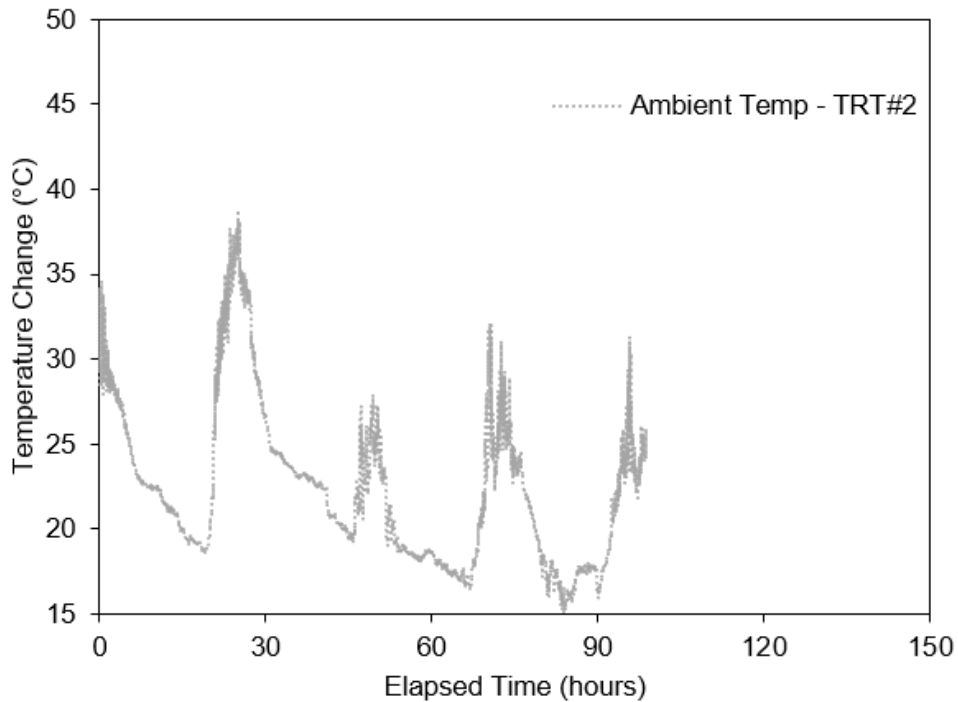


Figura 42 - Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido (TRT#2)

Analogamente ao TRT#1, a partir do registro de temperatura de entrada e saída da estaca geotérmica foi quantificado o calor depositado no sistema durante o ensaio com a utilização da equação 1, Figura 43.

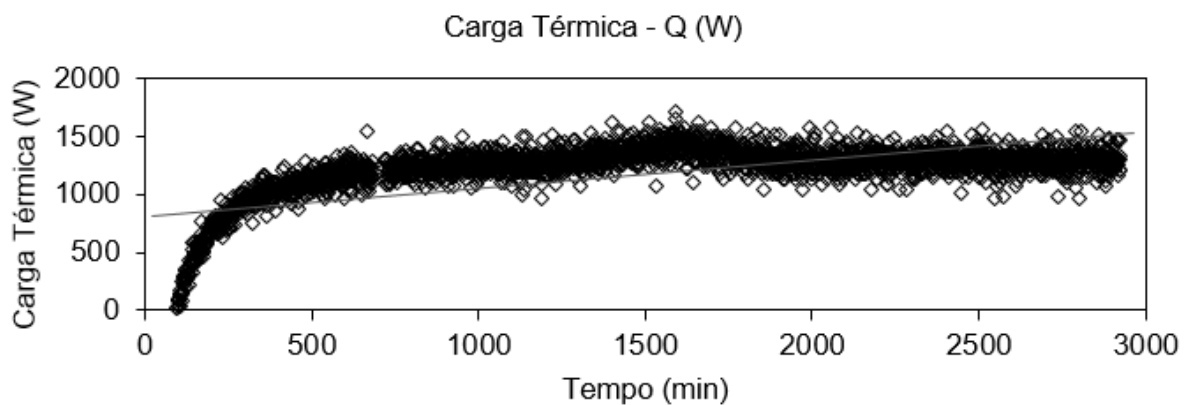


Figura 43 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio (TRT#2)

Desconsiderando o período transiente presente nas primeiras horas determina-se a quantidade média de calor depositado no sistema. Conforme citado anteriormente, Gehlin (2012) recomenda um descarte entre 12 e 20h. Além da recomendação é possível notar na Figura 43 o período inicial de aumento expressivo

das temperaturas de entrada e saída e da carga térmica. O tempo de descarte definido de acordo com a recomendação foi de 12h, resultado na Figura 44. A quantidade média de calor obtida foi de 1294,72 W e a quantidade média de calor por metro do comprimento da estaca foi de 107.89 W/m.

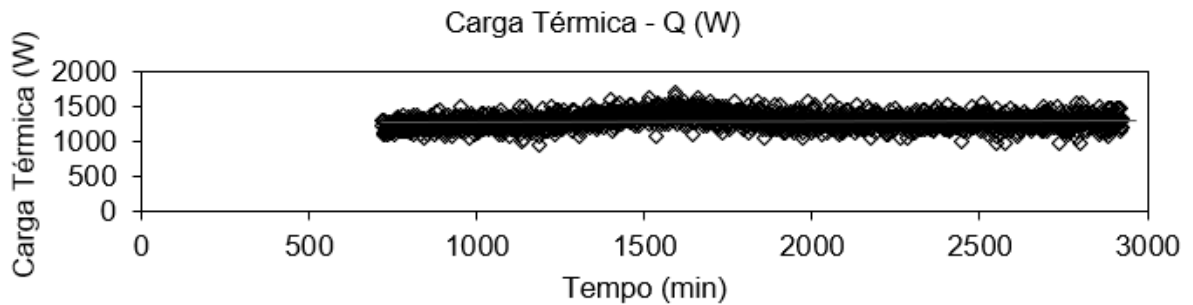


Figura 44 - Carga térmica real depositada no ensaio (TRT#2)

A Figura 45 mostra a média da temperatura de entrada (T_i) e a temperatura de saída (T_o) do fluido em (K) pelo logaritmo natural do tempo em segundos. Utilizando um tempo de descarte de 12 horas o valor da inclinação (k) da regressão linear encontrada é de 3.8187.

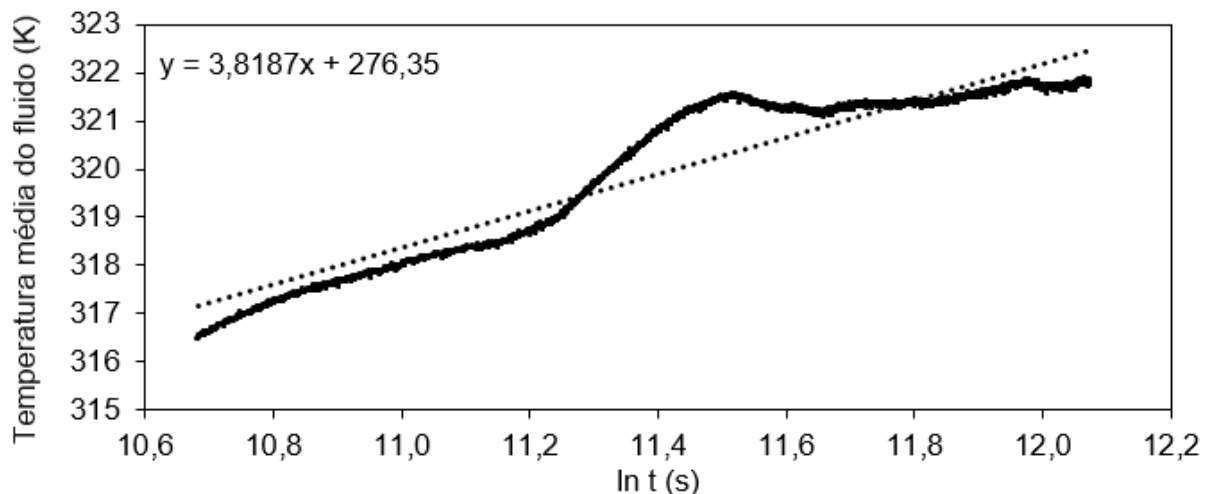


Figura 45 - Temperatura do fluido x $\ln t$ (s) – TRT#2.

Uma vez obtida a inclinação (k) o valor da condutividade térmica (λ) média obtida através da equação 3 foi igual a 2.25W/m.K. A difusividade térmica (α) foi posteriormente calculada pela equação 5 e o valor obtido foi de $7,75 \times 10e-7m^2/s$.

4.2.3 - TRT #3 – Comportamento Térmico.

No terceiro ensaio (TRT#3) foi utilizada uma resistência para aquecimento do fluido com potência de 3000 W, garantindo um gradiente de temperatura maior imposto no sistema quando comparado com os outros testes. O terceiro ensaio (TRT#3) teve duração total de aproximadamente 75 horas e foi finalizado após a estabilização das leituras de temperatura e deformação do sistema. A vazão aplicada ao sistema foi de 8,1 gpm, convertida para vazão em massa obteve-se 0,323 kg/s.

Como realizado nos outros testes, nos primeiros 30 minutos do ensaio, a bomba de circulação foi ligada sem o ligamento da fonte térmica permitindo a obtenção da temperatura média inicial do solo sem perturbação. A temperatura média inicial do solo registrada foi de 27,96°C, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Temperatura do solo não perturbado TRT#3

Tempo (min)	Thermistor In (°C)	Thermistor Out (°C)
0	27,78	27,82
2	27,81	27,84
4	27,83	27,82
6	27,87	27,88
8	27,90	27,91
10	27,88	27,93
12	27,93	27,93
14	27,96	27,95
16	27,96	27,98
18	28,00	28,01
20	28,03	28,05
22	28,03	28,03
24	28,05	28,06
26	28,07	28,07
28	28,12	28,10
30	28,12	28,12
média	27,96	

A Figura 46 mostra a variação de temperatura do fluido na entrada e na saída da tubulação trocadora de calor da estaca. A variação de temperatura ambiente registradas é representada na Figura 47. Vale ressaltar que a temperatura do fluido alcançada nesse teste é maior quando comparada aos outros 2, devido ao emprego da resistência com maior potência, inclusive as curvas de temperatura de entrada e

de saída apresentam maior disparidade quando comparadas as dos outros testes, a diferença de temperatura de entrada e saída chega a quase 2 °C.

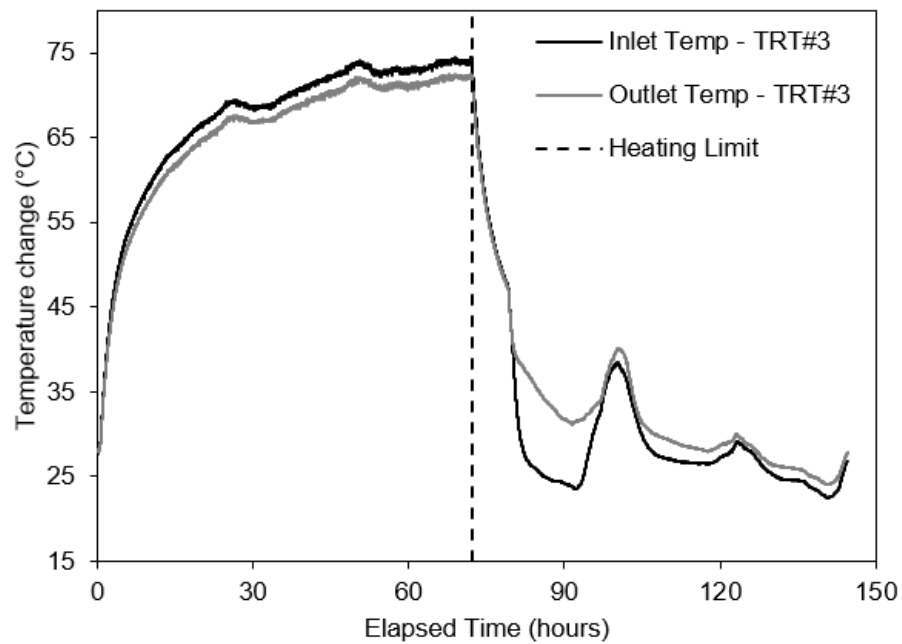


Figura 46 - Variação da temperatura na estaca x tempo decorrido – TRT#3

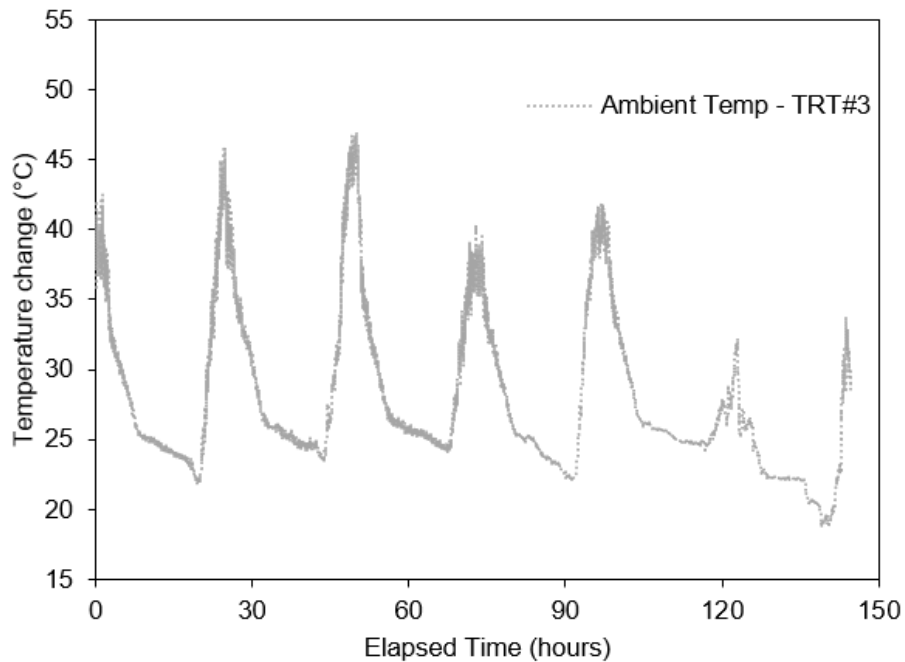


Figura 47 - Variação de temperatura ambiente x tempo decorrido (TRT#3)

A partir do registro de temperatura de entrada e saída da estaca geotérmica foi quantificado o calor depositado no sistema durante o ensaio com a utilização da equação 1, (Figura 48).

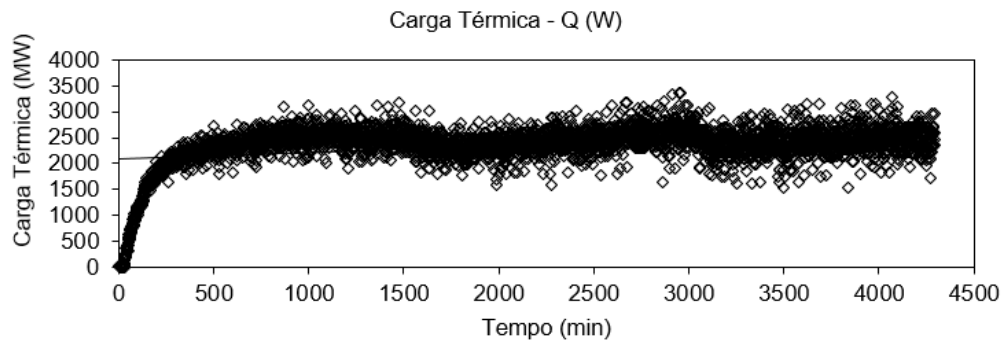


Figura 48 - Carga térmica (Q) depositada no ensaio (TRT#3)

Conforme citado anteriormente, Gehlin (2012) recomenda um descarte do período transiente entre 12 e 20h. Além da recomendação é possível notar na Figura 48o período inicial de aumento expressivo das temperaturas de entrada e saída e da carga térmica. O tempo de descarte definido de acordo com a recomendação foi de 12h, resultado na Figura 49. A quantidade média de calor obtida foi de 2404,57W e a quantidade média de calor por metro do comprimento da estaca foi de 200.38 W/m. o valor alto de quantidade média de calor se dá pelo fato da eficiência do sistema, onde a diferença entre temperatura de entrada e saída da estaca se mantém maior quando comparada aos outros ensaios.

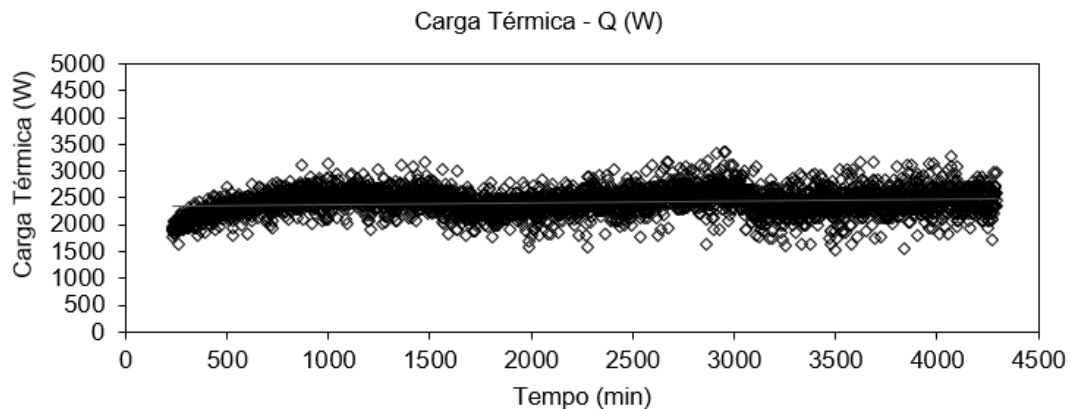


Figura 49 -Carga térmica real (Q) depositada no ensaio (TRT#3)

A Figura 50 mostra a média da temperatura de entrada (T_i) e a temperatura de saída (T_o) do fluido em (K) pelo logaritmo natural do tempo em segundos. Utilizando um tempo de descarte de 12 horas o valor da inclinação (k) da regressão linear encontrada é de 8,0323.

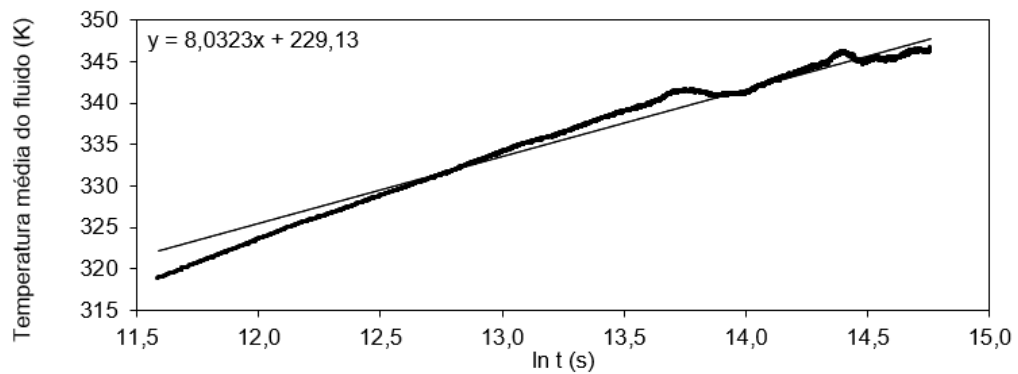


Figura 50- Temperatura do fluido x $\ln t$ (s) – TRT#3.

Uma vez obtida a inclinação (k) o valor da condutividade térmica (λ) média obtida através da equação 3 foi igual a 1,99W/m.K. A difusividade térmica (α) foi posteriormente calculada pela equação 5 e o valor obtido foi de $2,26 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

4.2.4 - Comparativo entre TRT 1, 2, 3 – Comportamento Térmico.

A Tabela 8 exhibe os resultados comparativos entre os três TRTs realizados nesta pesquisa na estaca térmica localizada nas intermediações da UENF. Os primeiros dois TRTs tiveram uma resistência de 1300 W e o terceiro de 3000w.

Tabela 8 - Comparativo entre os 3 TRTs

TRT	Duração do ensaio (horas)	Vazão (l/min)	Temp Solo não Perturbado (°C)	Potência da fonte (W)	Carga Térmica (W)	Condutividade Térmica (W/mK)	Resistência Térmica Média (mK/W)	Taxa de troca de calor por metro (W/m)
1	75	30,1	24,13	1300	1083,68	2,02	0.20	90,31
2	50	19,4	27,91	1300	1294,72	2,25	0.14	107,89
3	75	19,4	27,96	3000	2404,57	1,99	0.10	200,38

É possível notar na tabela acima uma diferença entre os valores da carga térmica (Q), da condutividade térmica e da resistência térmica entre o TRT 1 e 2 e os TRT 3. Essa diferença está associada à diferente potência da fonte utilizada para cada TRT e também de vazão empregada no sistema.

De acordo com Zhang et al. (2012), valores elevados de condutividade térmica e valores menores de resistência térmica permitem que o calor seja trocado com o solo em uma maior proporção. Nos dois primeiros TRTs foram impostas vazões diferentes e mesma potência. O valor de carga térmica encontrado para o TRT#1 é inferior ao encontrado para o TRT#2 pois, a vazão empregada no primeiro TRT foi maior do que a empregada no TRT#2, proporcionando uma menor troca de calor entre o sistema e o solo. Já no TRT#3 foram encontrados valores maiores de carga térmica devido a potência mais elevada utilizada nesse ensaio.

A flutuação do nível d'água durante o ensaio deve ser monitorada e observada, pois é um ponto importante no que diz respeito a condutividade térmica e eficiência no sistema. Sanner et al 2005, afirma que a água é um excelente condutor de calor, por isso a parcela de solo abaixo do nível d'água conduz calor de forma mais rápida que o solo acima. Além disso existe o fato do fluxo de água subterrânea, se houver um fluxo grande de água, a condutividade térmica do solo fica mascarada. No TRT#2 houve uma elevação no nível do lençol freático devido a precipitação ocorrida no período do ensaio em questão, esse fato possivelmente corroborou para o aumento expressivo da carga térmica observada no ensaio. Desta forma, os parâmetros obtidos no TRT#2 podem ter sido mascarados pela flutuação do nível d'água e pelo problema técnico observado na resistência de imersão neste ensaio. Foi observada uma carga térmica média de 1294,72 W para uma potência de 1300W.

Segundo Olgun e McCartney (2014), um terreno com taxa de calor por volta de 80W/m pode ser classificado com excelente potencial geotérmico. Portanto, com base nos resultados obtidos pelos 3 ensaios, para a estaca em questão indica que à estaca possui excelente potencial geotérmico. Além disso, o Eurocode (CENTC 341 N525 2011) infere que solos com condutividade térmica acima de 1,7 W/mK são considerados de alta condutividade térmica, classificando o solo em estudo como de alta condutividade térmica.

4.3 - Comportamento Termomecânico - TRT#1, 2 e 3

A estaca foi submetida a três testes distintos, nos dois primeiros testes (TRT#1 e TRT#2) foi utilizado com uma potência de 1300 W. A fim de avaliar o efeito de um maior gradiente de temperatura, foi utilizada no terceiro teste (TRT#3) uma potência

de 3000 W, garantindo assim uma variação de temperatura mais significativa quando comparado aos outros testes.

O primeiro teste de resposta térmica, intitulado TRT#1 alcançou um gradiente de temperatura médio imposto na estaca de aproximadamente 15 °C, o que infere uma temperatura total no sistema de, em média, 45 °C. Vale ressaltar que menores variações de temperatura foram observadas na profundidade de aproximadamente 8 metros, representando a camada de solo argiloso, possivelmente devido à baixa difusibilidade apresentada por esse tipo de solo. Além do mais, temperaturas maiores são observadas nas camadas de solo arenoso.

O segundo teste de resposta térmica (TRT#2) atingiu um gradiente de temperatura médio imposto na estaca de aproximadamente 12 °C, o que infere uma temperatura total no sistema de, em média, 42 °C. Neste teste, ocorreu um problema técnico na resistência de imersão, fazendo com que o teste tivesse uma duração e temperatura menores quando comparados aos outros. Analogamente ao TRT#1, menores variações de temperatura foram observadas camada de solo argiloso e maiores temperaturas são observadas nas camadas de solo arenoso.

O terceiro teste (TRT#3) atingiu um gradiente de temperatura de em média 23°C, inferindo ao sistema uma temperatura de, em média, 53°C. Menores variações de temperatura foram observadas camada de solo argiloso e maiores temperaturas são observadas nas camadas de solo arenoso.

Em síntese, O acréscimo de temperatura alcançado durante os 3 TRTs (TRT#1, TRT#2 e TRT#3) foram 15, 12 e 23 °C respectivamente. Os incrementos de temperatura versus profundidade para cada teste são apresentados na Figura 51.

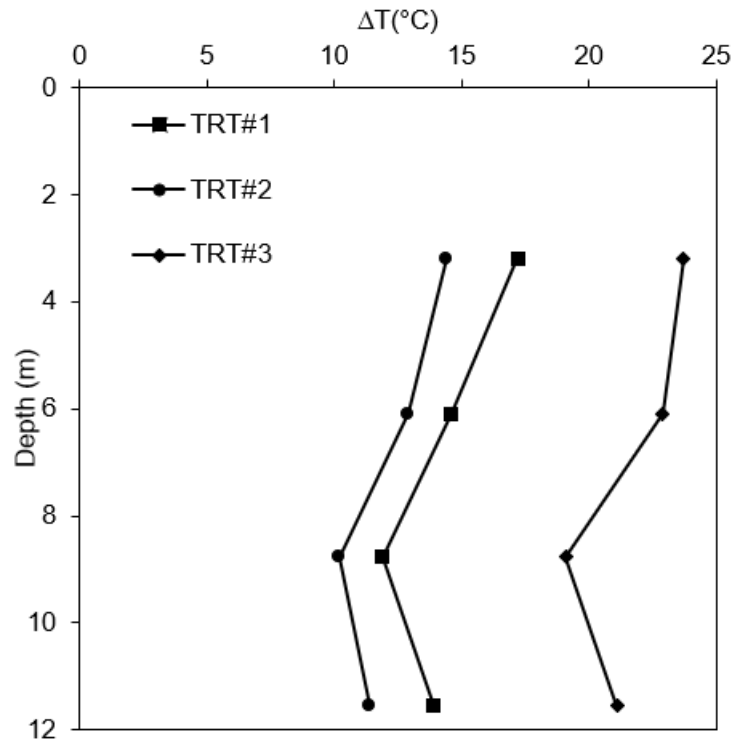


Figura 51 - Perfil de gradiente de temperatura

As variações de temperatura impostas na estaca geram deformações térmicas adicionais. Quando a estaca é aquecida, deformações relacionadas a expansão da estaca são notadas. No primeiro teste (TRT#1) é possível observar deformações mais expressivas nas extremidades da estaca, devido ao fato de que estas possuem elevado grau de liberdade para se deformar nessas direções. Por outro lado, menores deformações são observadas na camada de solo argiloso, cerca de $130 \mu\epsilon$.

No segundo Teste (TRT#2), as maiores deformações são análogas ao primeiro ensaio, onde deformações mais expressivas são observadas nas extremidades da estaca. Por outro lado, menores deformações são observadas na cama de solo argiloso, cerca de $90 \mu\epsilon$, em contrapartida na ponta da estaca foram observadas deformações na ordem de $120 \mu\epsilon$.

No terceiro teste, onde um gradiente maior de temperatura foi imposto, deformações na ordem de $250 \mu\epsilon$ foram observadas nas extremidades da estaca, em contrapartida, menores deformações foram observadas na camada de solo argiloso, corroborando com os resultados observados nos demais testes, porém com expressividade maior devido ao gradiente de temperatura maior.

Bourne-Webb et al. (2013) corrobora a influência das restrições na resposta termomecânica da estaca. Segundo ele, a resposta termomecânica da estaca será

dependente da mudança de temperatura aplicada à estaca e das restrições impostas pelo solo que a circunda. Em uma situação onde a estaca não sofra restrição alguma, ocorreria deformação livre e as tensões induzidas seriam menores, já se o movimento da estaca fosse mais restringido, as tensões axiais na estaca aumentariam em proporção à mudança de temperatura e as deformações térmicas seriam pequenas. O perfil de deformação térmica e temperatura para cada ensaio de acordo com a profundidade são plotados na Figura 52. É importante notar que menores temperaturas e menores deformações são observadas na profundidade de 9m, camada de solo argiloso que apresenta baixa difusividade, por outro lado, deformações maiores são observadas nas extremidades da estaca, próximos ao topo e a base da mesma, possivelmente devido a condição de contorno da estaca que está menos restrita para se deformar nessas direções. Especificamente, a estaca térmica não estava conectada a uma superestrutura e, portanto, é livre para se deslocar axialmente. Além disso, o método construtivo da estaca leva a uma restrição mínima em sua base, levando a uma condição de deslocamento livre nesta direção também.

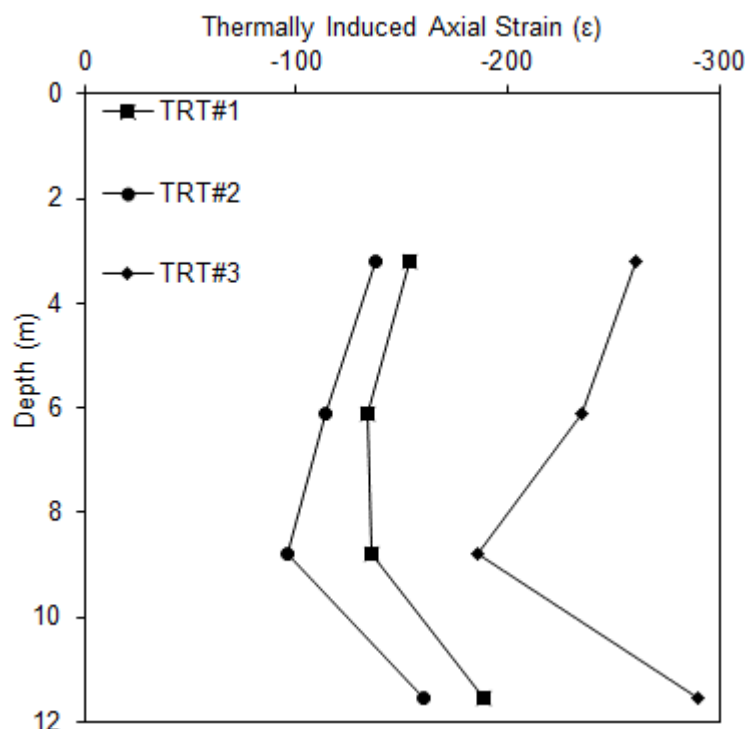


Figura 52 - Perfil de deformação térmica

Subsequentemente, foram calculadas as tensões adicionais que devem ser levadas em consideração em seu dimensionamento estrutural. Essas tensões são geradas devido à restrição a deformação provocada pelo solo circundante no interior

da estaca ao ser submetida aos ciclos de aquecimento. O resultado está apresentado na Figura 53 onde é possível observar as tensões térmicas geradas durante o aquecimento.

A estaca ficou submetida somente a esforços de compressão durante os três ensaios, tendo seu valor máximo entre as profundidades de 6,11m e 8,77m, locais de maior restrição, e conseqüentemente menor deformação. A máxima tensão de compressão na qual a estaca foi submetida, foi de 4 MPa, que é um valor bem inferior à resistência à compressão do concreto utilizado nessa estaca de 29,6 Mpa.

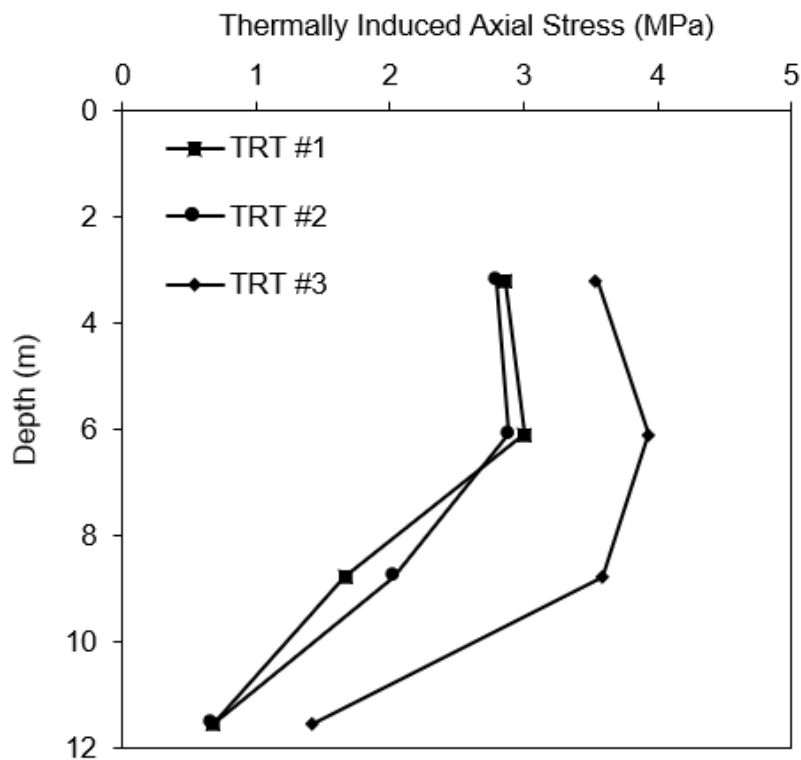
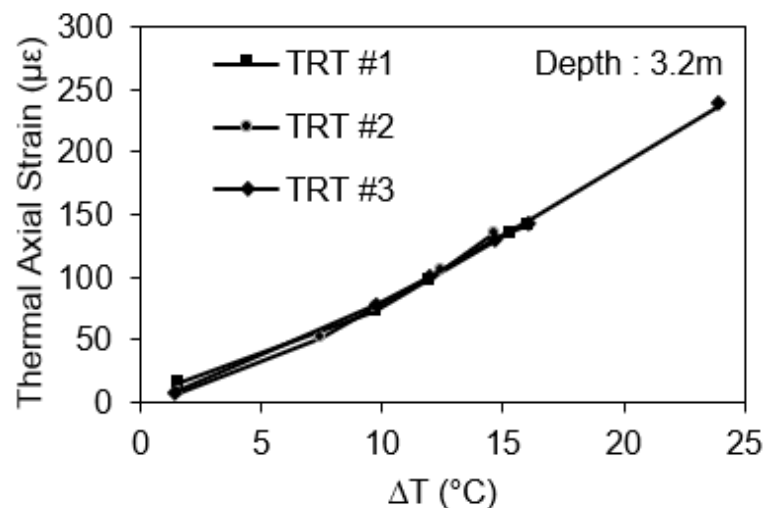


Figura 53 - Perfil de Tensão térmica induzida ao longo dos ensaios.

Posteriormente, foram plotados os acréscimos de deformações térmicas em função do acréscimo de temperatura, esse parâmetro é de extrema importância pois a inclinação de cada curva permite a determinação do coeficiente de expansão térmica ao longo da estaca (Figura 54), parâmetro muito notável quando se diz respeito a histerese e entendimento do comportamento das estacas térmicas a longo prazo. Vale ressaltar que a relação entre acréscimo de temperatura e acréscimo de deformação apresenta certa linearidade e pode ser comparada com os resultados apresentados por Murphy Et al (2015).

Analisando os incrementos de deformação térmica versus a mudança de temperatura de cada teste nos sensores localizados a uma profundidade de 8,77 m em uma camada de argila e na profundidade de 11,55m localizados em uma região de transição entre argila orgânica e areia (Figura 54) as inclinações das curvas elevavam-se com as mudanças de temperatura. Isso pode ser relacionado com um aumento na resistência lateral devido à elevação da temperatura nos ciclos de aquecimento subsequentes. Esse comportamento foi relatado por Di Donna et al. (2015), que estudou o efeito da interface argila-concreto em diferentes temperaturas, após ciclos de aquecimento e resfriamento e pode ser explicado pela consolidação térmica da argila durante o aquecimento de amostras que não eram pre-adensadas. É importante notar que nos estudos apresentados por Di Donna e Laloui (2013) e Di Donna et al. (2015) sobre o comportamento da interface argila/concreto, o aumento da resistência lateral com o aumento da temperatura foi explicado pela consolidação térmica da argila durante o aquecimento de argilas que normalmente adensadas. Esse estudo confirma que os efeitos do gradiente de temperatura na camada de argila em um solo normalmente adensado tem um impacto significativo e pode funcionar a favor da segurança aumento a resistência latera do solo (Amatya et al. (2002)).



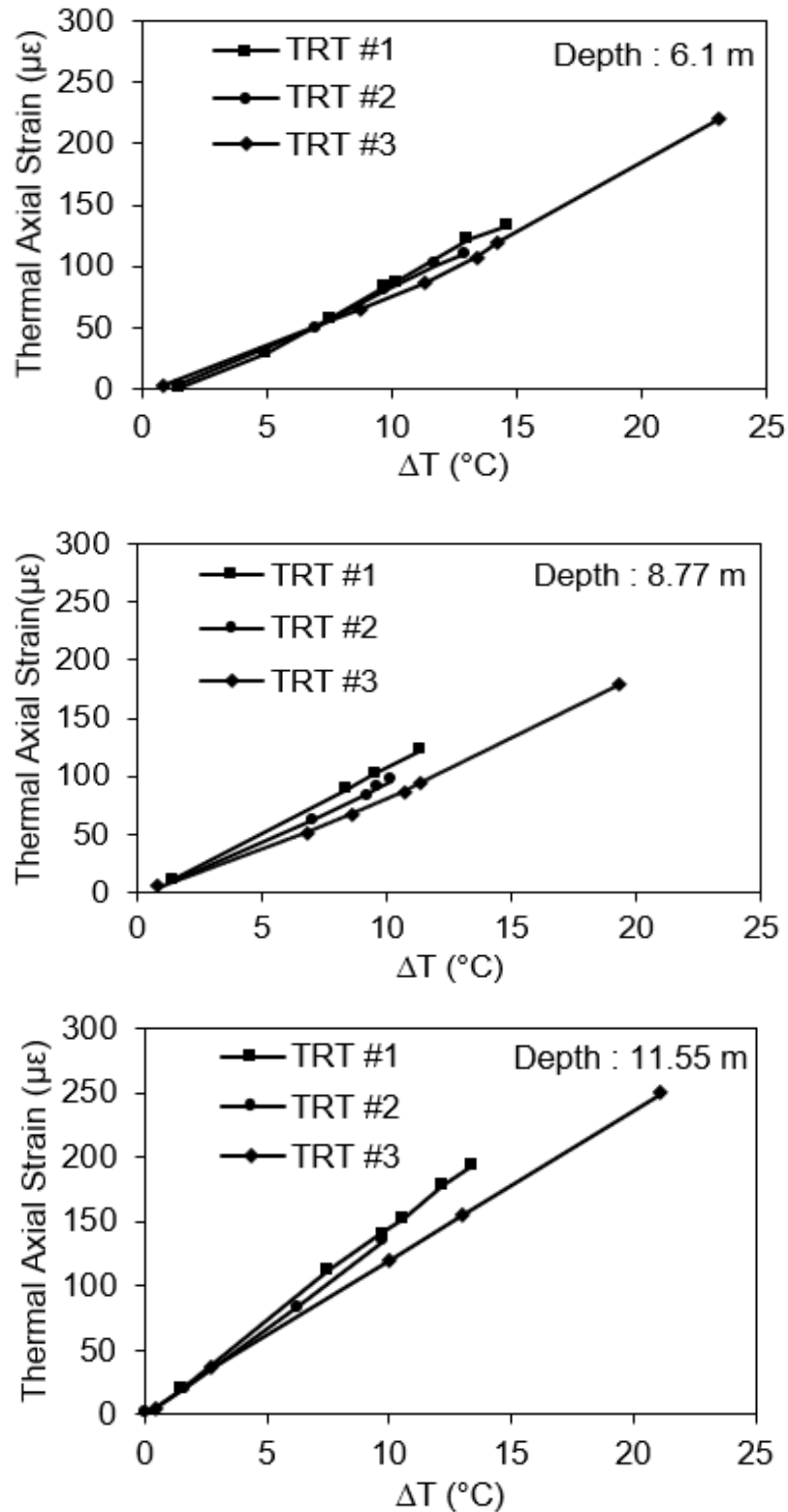


Figura 54 - Incrementos de Deformação Térmica versus incremento de Temperatura

Utilizando os valores da inclinação das retas Figura 54, é possível obtenção dos valores de coeficiente de expansão térmica mobilizado. Caso a estaca estivesse livre para se deformar, o valor do coeficiente de expansão térmica seria $16 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. A Figura

55 demonstra esses valores. Vale ressaltar que é possível observar uma redução nos valores do coeficiente de expansão térmica ao longo dos ensaios, esse fato será melhor discutido posteriormente.

Quanto maior o valor do coeficiente de expansão térmica, menos restrita está à estaca e mais deformações são observadas durante a realização dos ensaios. Pode-se observar que o maior valor de coeficiente de deformação térmica ocorreu na base da estaca, nos três ensaios, representando pouca restrição à deformação nesta região, possivelmente devido a técnica utilizada no processo construtivo da estaca. De acordo com Brandl, (2006) e Moradshahi et al. (2020) o processo construtivo das estacas tem grande influência na performance geotécnica de fundações térmicas. Por outro lado, menores valores de coeficiente de expansão térmica foram observados na profundidade de 8,77 m onde também ocorreu o mínimo de deformação térmica, possivelmente devido à presença de argila nessa camada.

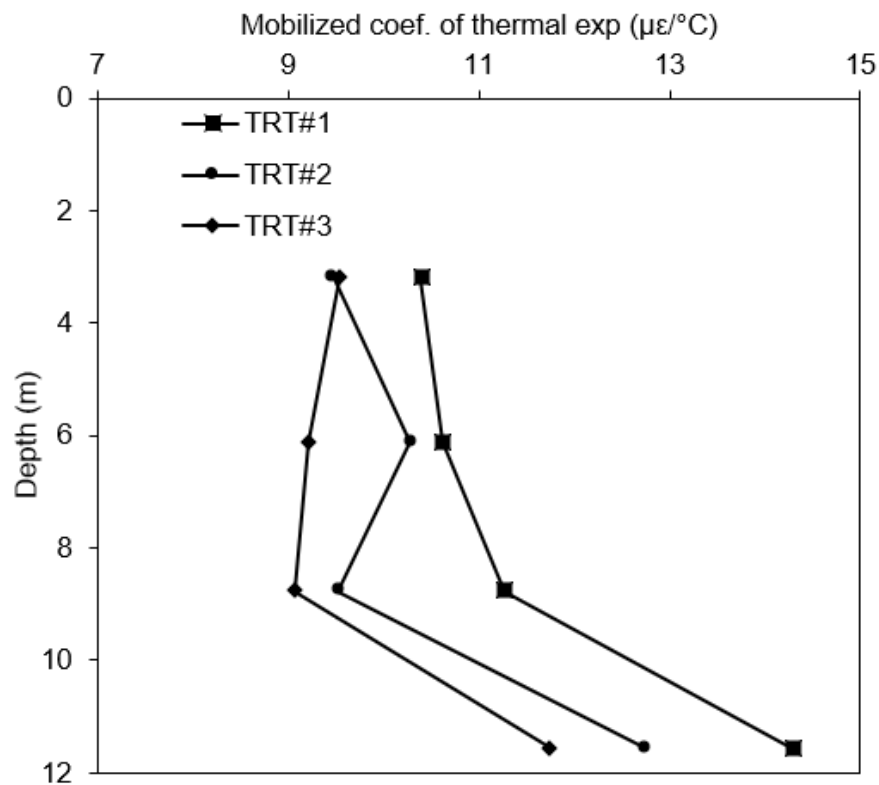
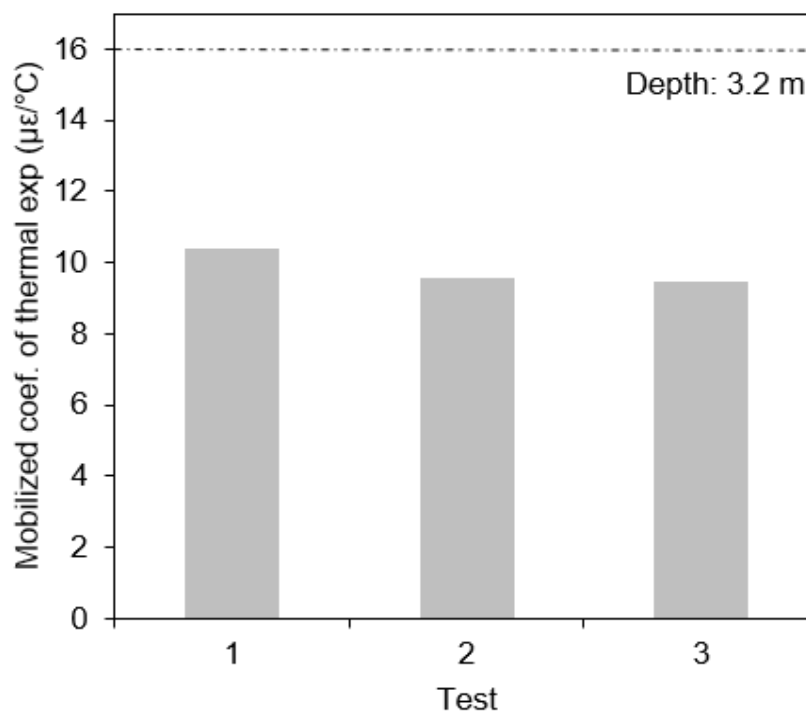


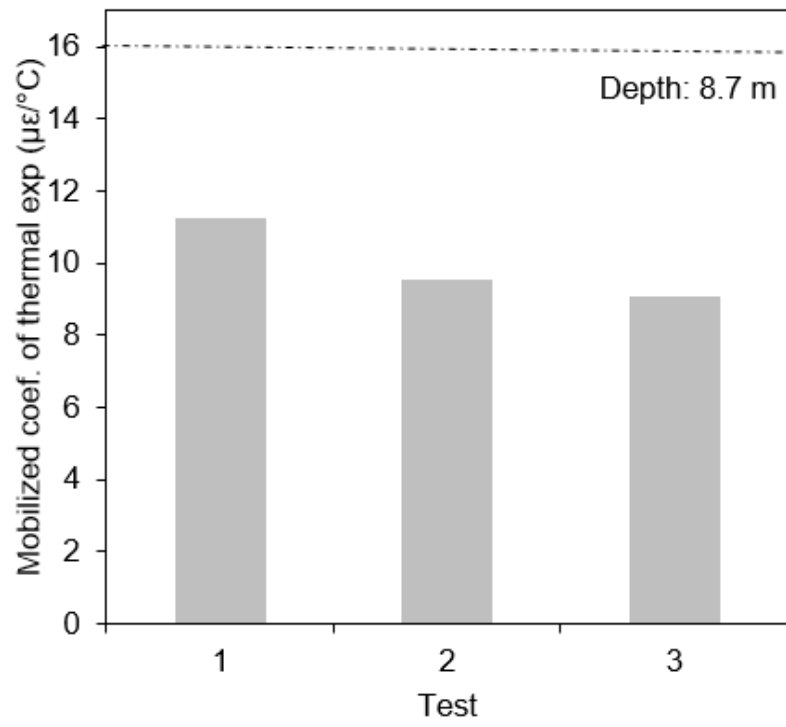
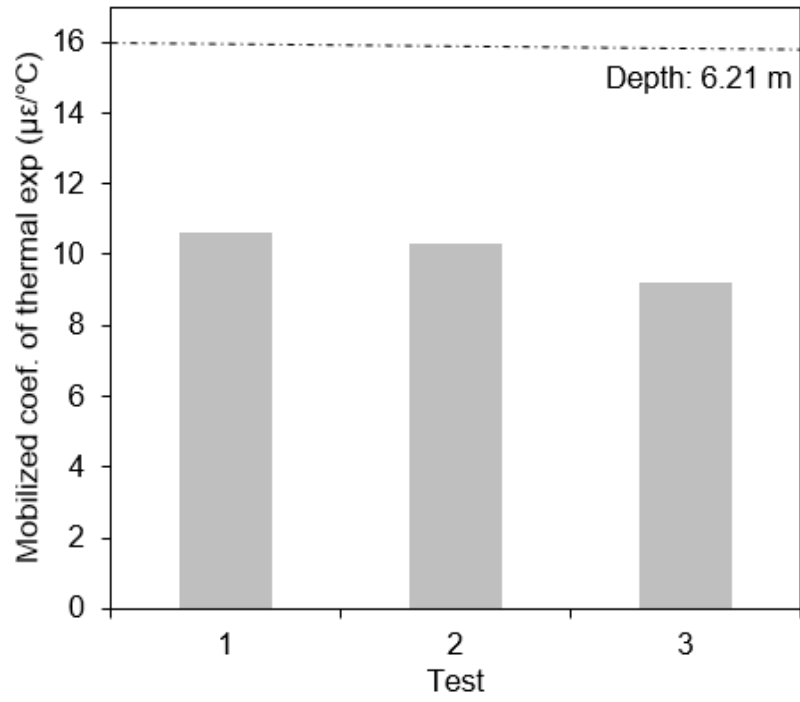
Figura 55 - Coeficiente de Expansão Térmica ao longo da profundidade para cada teste

Para avaliar melhor o efeito dos ciclos de aquecimento na estaca, o coeficiente de expansão térmica para cada profundidade em cada ensaio é plotado na Figura 56. Ao longo dos ensaios, à estaca apresentou valores de coeficiente de expansão

térmica menores, indicando menores deformações para o mesmo incremento de temperatura, esse comportamento pode ser associado ao incremento de resistência lateral devido ao aquecimento. A diminuição do coeficiente de expansão térmica mobilizado indica um aumento na restrição observada nessa profundidade, corroborando com os resultados apresentados por McCartney e Rosenberg, (2011), na qual a fundação foi aquecida e foi observado um aumento na resistência quando comparado com fundações testadas em temperatura ambiente.

Esse fato se torna possível pois o processo de secagem induzido pelo processo de aquecimento leva a um aumento da restrição ao longo dos ensaios, como observado por Behbehani e McCartney (2020), podendo também ser associado ao processo de consolidação térmica da camada de argila mole, resultando em maior restrição a deformação. Considerando os 3 testes, especificamente nos sensores da ponta, o coeficiente de expansão térmica mobilizado é similar ao coeficiente de expansão térmica do concreto livre ($16 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$).





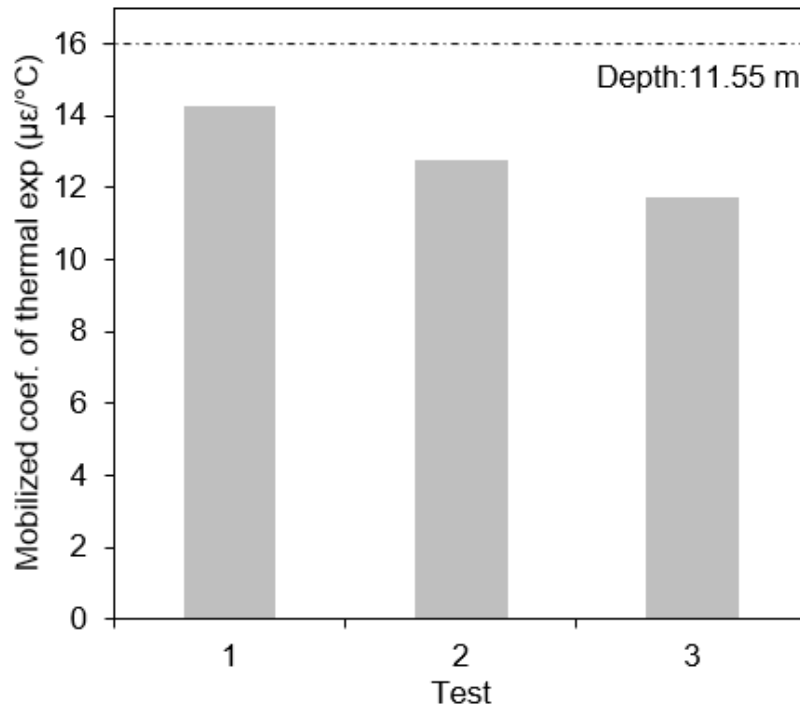


Figura 56 - Coeficiente de expansão térmica mobilizado em cada profundidade em cada ensaio.

Os efeitos do processo de aquecimento da estaca nas camadas de solo circundantes a ela, se mostraram notáveis. Para melhor entender esse comportamento, é interessante o estudo do Grau de liberdade (DOF) da estaca, definido pela razão entre a deformação livre e a deformação observada, $\varepsilon_{T-livre}$ e $\varepsilon_{T-observada}$ (Knellwolf et al. 2011).

$$DOF = \frac{\varepsilon_{T-livre}}{\varepsilon_{T-observada}}$$

O Grau de liberdade é teoricamente zero quando a estaca é completamente restrita (bloqueada) e 1 quando completamente livre para se deformar. Geralmente, varia de 1 a 0 devido as variações de atrito lateral mobilizado e das condições de restrição das suas extremidades (Knellwolf et al. 2011). Os valores do grau de liberdade ao longo da estaca em todos os testes são mostrados na Figura 57. O menor valor de restrição é observado na profundidade de 11.55m, correspondente aos pontos de máxima deformação térmica localizados nas extremidades da estaca. Esse fato se relaciona com a pouca restrição proporcionada pela última camada de solo juntamente com a pouca resistência observada devido a técnica construtiva da estaca,

como mencionado anteriormente. De acordo com Brandl et al (2006) o processo construtivo da estaca exerce grande influência na performance geotécnica das estacas térmicas. Por outro lado, uma maior restrição a deformação foi observada na profundidade de 8-10m, correspondente a presença da camada de solo argiloso. Desde o TRT#1 até o último TRT (TRT#3) uma redução de aproximadamente 0.11 no grau de liberdade foi observada, representando um aumento na resistência oferecida pelo solo que circunda a estaca com o passar dos três ciclos de aquecimento.

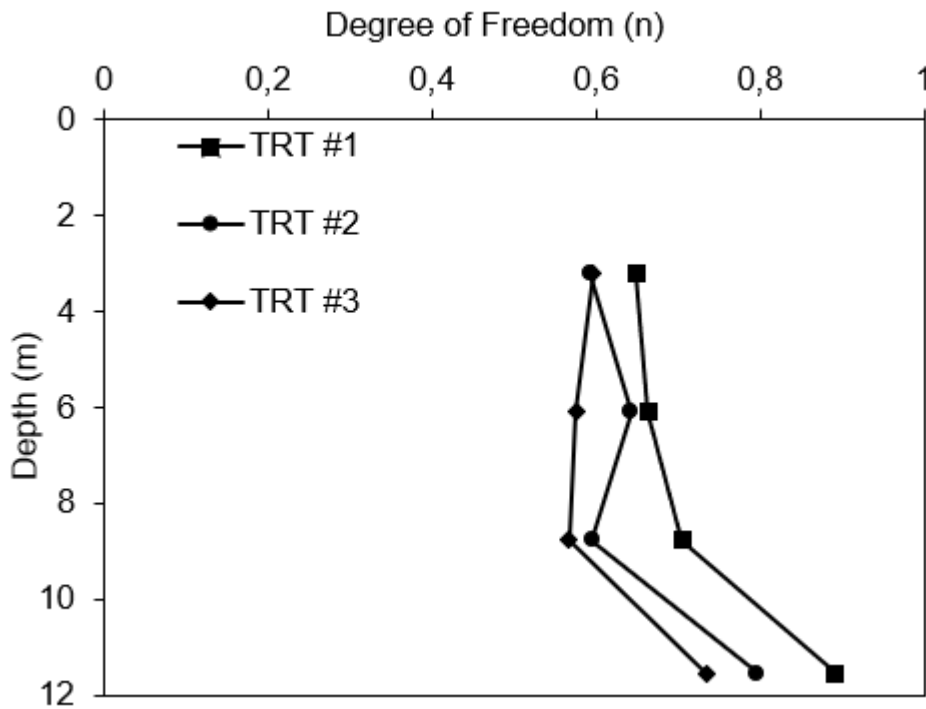


Figura 57 - Grau de liberdade ao longo da estaca.

4.4 – Análise da histerese

Como mencionando anteriormente, o processo de histerese é caracterizado pelas deformações permanentes residuais ao fim de cada ensaio. Ela pode ser significativa ou desconsiderada dependendo do seu grau em relação a deformação total observada ao fim de cada ensaio, além do mais, ela pode variar de acordo com cada tipo de solo.

A seguir serão apresentados os resultados dos 3 testes de respostas térmicas, nos quais à estaca foi submetida. Foram plotadas as deformações em relação à profundidade para cada sensor em cada teste nos três estágios do teste, início do

aquecimento, fim do aquecimento e fim do resfriamento (Figura 58, Figura 59, Figura 60). Vale ressaltar que no terceiro teste (TRT#3) foi imposta uma maior variação de temperatura na estaca, obtendo assim maiores deformações. As leituras de deformação foram zeradas ao início de cada ensaio (na análise dos resultados e não no ensaio). Os resultados obtidos apresentam uma boa repetibilidade no comportamento entre os testes.

Na Figura 61 foram plotados os valores de deformação residual dos 3 ensaios realizados, ao fim do resfriamento, para posterior comparação. Analisando os primeiros 2 testes (TRT#1 e TRT#2) nos quais a temperatura imposta foi similar, as deformações residuais térmicas ao fim do resfriamento praticamente voltam aos valores de deformação térmica observadas ao início do ensaio, quando nenhum gradiente de temperatura fora imposto na estaca, indicando deformações elásticas e, conseqüentemente um comportamento termo-elástico, o que indica que deformações permanentes plásticas não ocorreram na estaca e, portanto, a histerese pode ser descartada. Por outro lado, ao analisar os dados provenientes do terceiro ensaio (TRT#3), no qual temperaturas elevadas foram aplicadas na estaca, em torno de 50% maior em comparação das temperaturas aplicadas nos primeiros dois ciclos de aquecimento, é possível notar que deformações irreversíveis ocorreram na interface solo-argila (Figura 61) indicando que deformações térmicas plásticas permanentes ocorreram na camada de argila.

Deve ser notado que deformações irreversíveis foram observadas durante o ciclo de aquecimento no qual uma temperatura maior foi imposta, representando que provavelmente a uma certa temperatura, a superfície de plastificação foi expandida e foram observadas deformações térmicas plásticas e elásticas na camada de solo argiloso, diferente dos dois testes anteriores. O que explicaria a similaridade da resposta termomecânica da estaca nos primeiros 2 testes, sugerindo que o estágio após a máxima temperatura ser atingida, nos 2 primeiros testes, é o suficiente para a argila recuperar suas propriedades mecânicas iniciais.

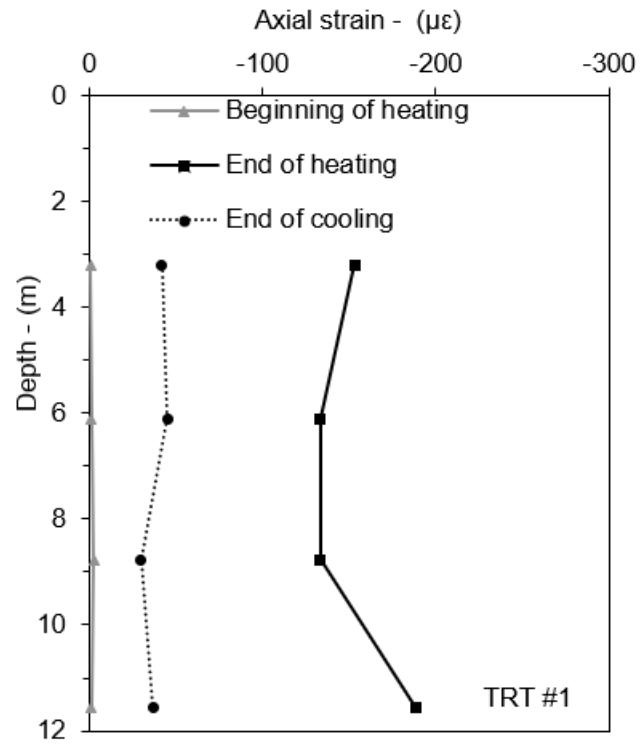


Figura 58 - Deformação residual - TRT#1

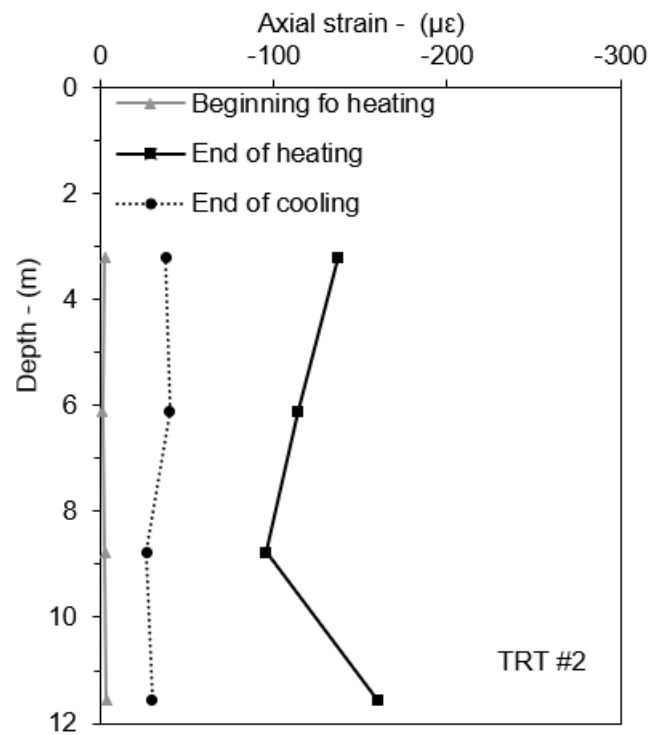


Figura 59 - Deformação residual - TRT#2

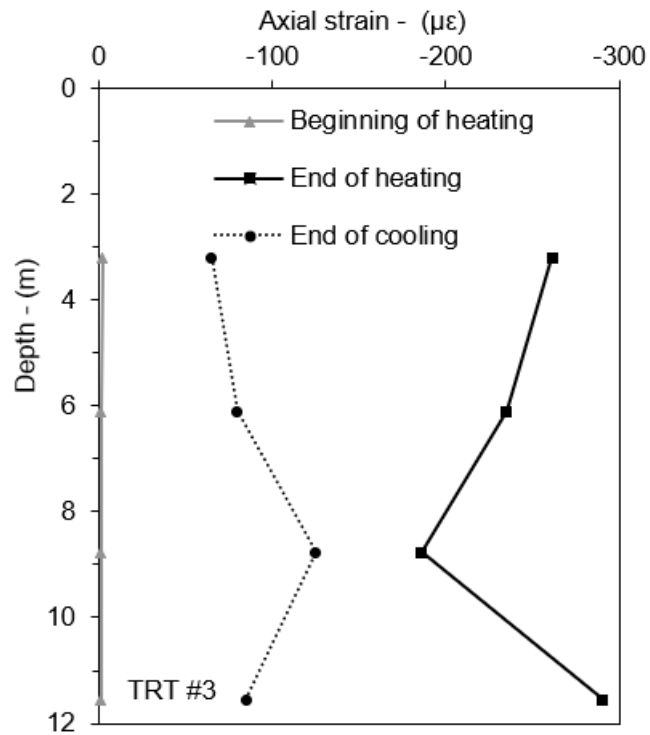


Figura 60 - Deformação residual - TRT#3

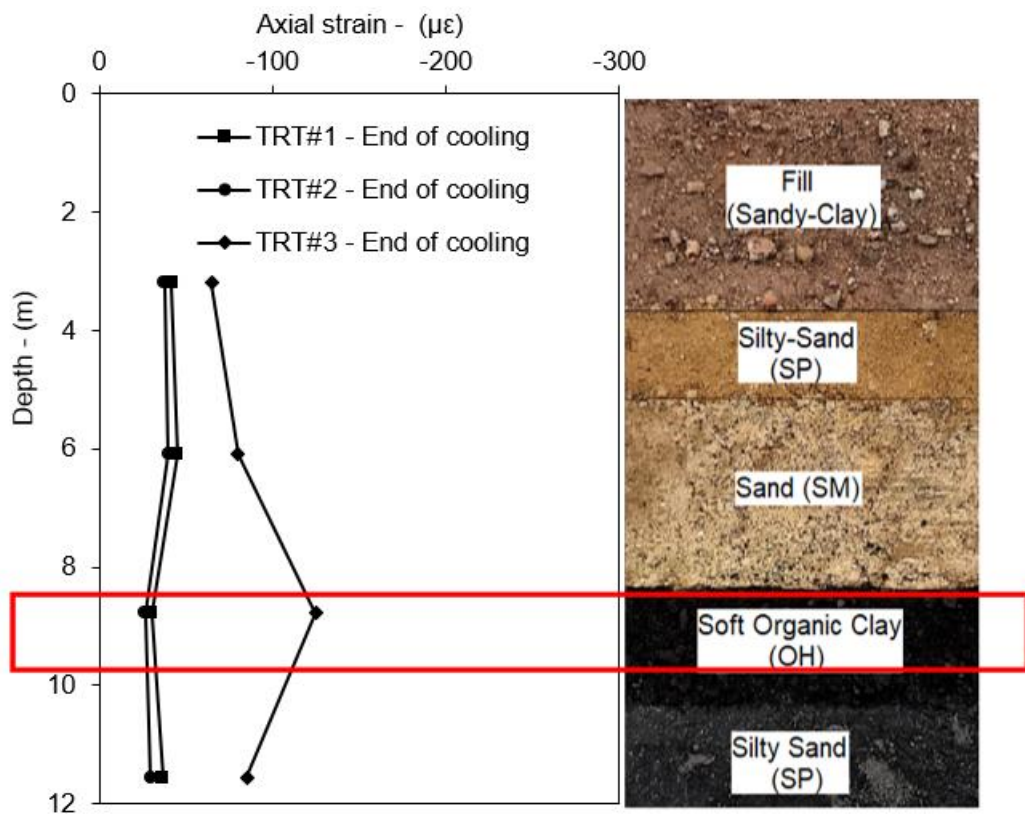


Figura 61 - Comparação da deformação residual - TRT#1, TRT#2 e TRT#3.

4.5 - Análise do deslocamento total no topo da estaca

Alguns materiais utilizados para confecção do equipamento de medição do deslocamento do topo da estaca possuem coeficiente de expansão térmica elevado o que pode ocasionar deformações notórias somente com a variação da temperatura ambiente. A fim de garantir a assertividade nas medições de deslocamento no topo da estaca, foram monitoradas as deformações do equipamento apenas com a variação da temperatura ambiente, por vários dias. Permitindo assim a quantificação dessa deformação extra na deformação real da estaca. Possibilitando resultados bastante satisfatórios e condizentes com a realidade.

4.5.1 – TRT#1 – Deslocamento no topo da estaca

A variação do deslocamento no topo da estaca em relação a variação de temperatura pode ser observada na Figura 62. O deslocamento máximo medido no topo da estaca para um incremento de temperatura de aproximadamente 20°C foi de 0.45mm. Foi monitorado o deslocamento até o resfriamento total da estaca, ou seja, até ser observada uma variação de temperatura nula em relação à temperatura inicial.

É interessante notar que findado o resfriamento da estrutura para temperatura inicial do sistema, o deslocamento no topo da estaca retorna para bem próximo de zero, podendo ser observadas pequenas variação de deslocamento na ordem de 0.01mm devido a variação da temperatura ambiente quando nenhuma fonte extra de calor era imposta ao sistema.

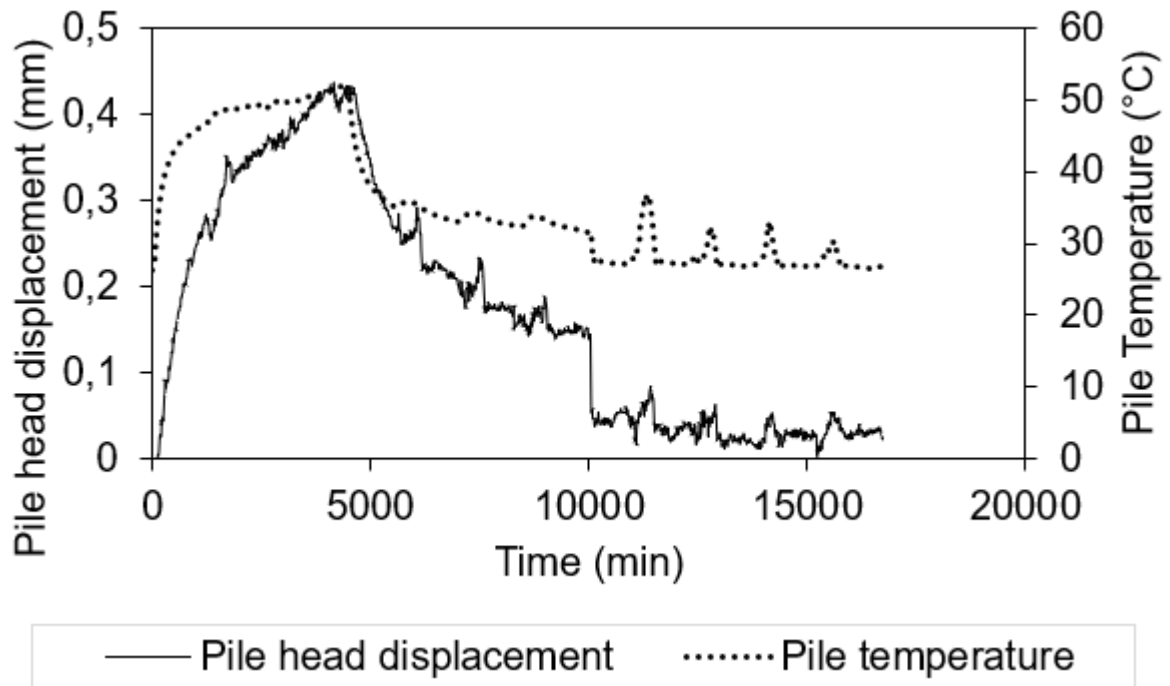


Figura 62 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#1

Uma análise interessante a ser feita a partir do deslocamento no topo da estaca, é o carregamento térmico que a estaca exerceria durante sua expansão no aquecimento, caso houvesse uma edificação sobre ela. A restrição ao deslocamento gera carregamentos extras pois impede a estaca de se expandir axialmente. Tal avaliação se faz necessária para o correto dimensionamento das edificações que utilizarão as estacas trocadoras de calor.

O carregamento térmico atuante no topo da estaca durante a realização do ensaio 1 (TRT#1) está representado na Figura 63. O carregamento adicional chegou a 140 kN, cerca de 15% da capacidade de carga da estaca. Neste ensaio, foi observado um acréscimo de temperatura de cerca de 20 °C, esta temperatura é contabilizada através do monitoramento das temperaturas de entrada e saída direto da estaca, por isso apresentam valores não coincidentes quando comparadas a temperaturas medidas diretamente pelos extensômetros dispostos no interior da estaca. Por se tratar de uma medida de temperatura direta e, os strain gauges medem a temperatura no interior da estaca, precisando de um tempo para o calor se dissipar e atingir o extensômetro.

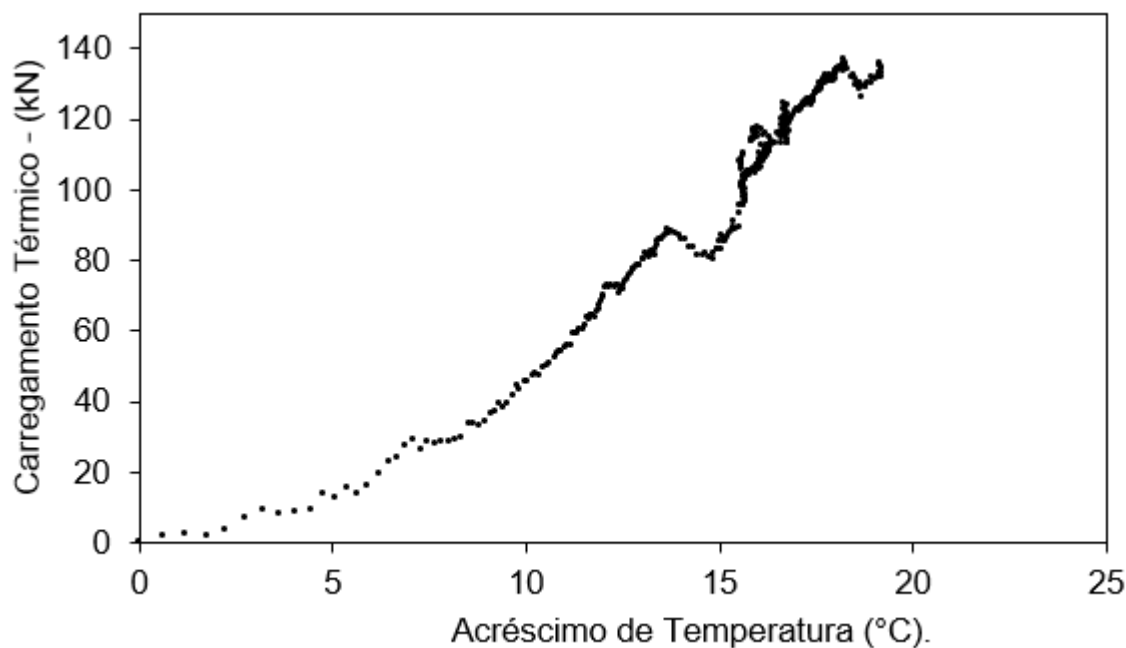


Figura 63 - Carregamento Térmico TRT#1

4.5.2 – TRT#2 – Deslocamento no topo da estaca

A variação do deslocamento no topo da estaca em relação a variação de temperatura pode ser observada na Figura 64. O deslocamento máximo medido no topo da estaca para um incremento de temperatura de aproximadamente 20°C foi de 0.23mm. No ensaio em questão, um deslocamento inferior foi observado quando comparado ao ensaio 1 pois ocorreu um problema técnico no aquecedor, não estabilizando assim, a temperatura máxima e não chegando a máxima capacidade de deformação. As medições foram interrompidas antes do resfriamento completo do sistema.

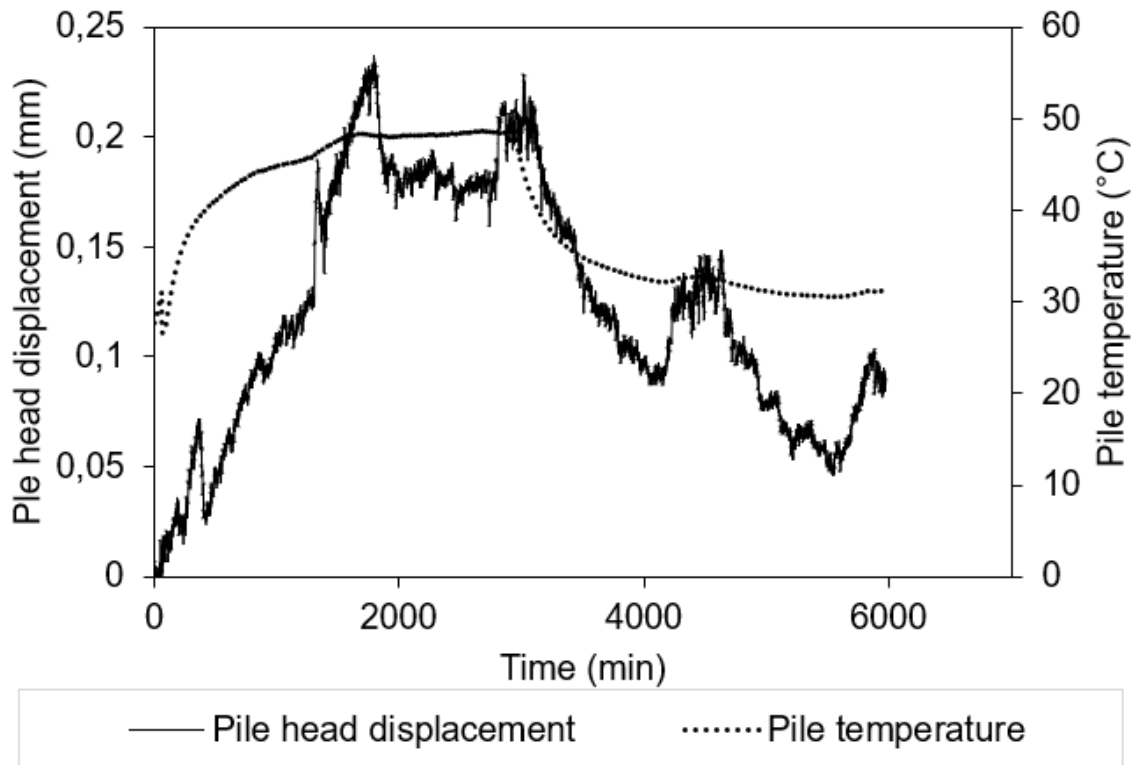


Figura 64 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#2.

Analogamente ao ensaio 1, foram realizados os cálculos para determinação do carregamento térmico para esse ensaio e estão apresentados na Figura 65. Cerca de 75 kN foram obtidos para carregamento térmico neste ensaio, representando 8% da capacidade de carga da estaca.

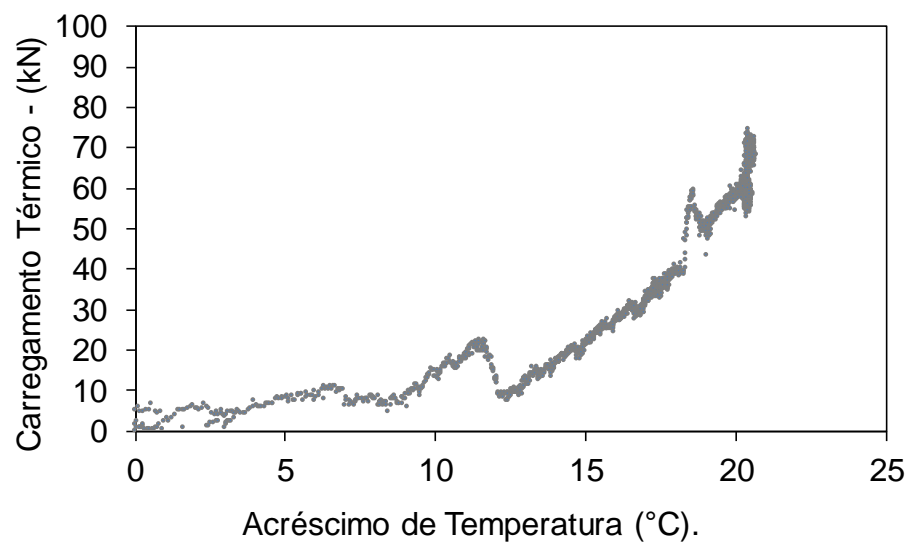


Figura 65 -Carregamento Térmico - TRT#2

4.5.3 – TRT#3 – Deslocamento no topo da estaca

A variação do deslocamento no topo da estaca em relação a variação de temperatura pode ser observada na Figura 66. O deslocamento máximo medido no topo da estaca para um incremento de temperatura de aproximadamente 45°C foi de 0.65mm.

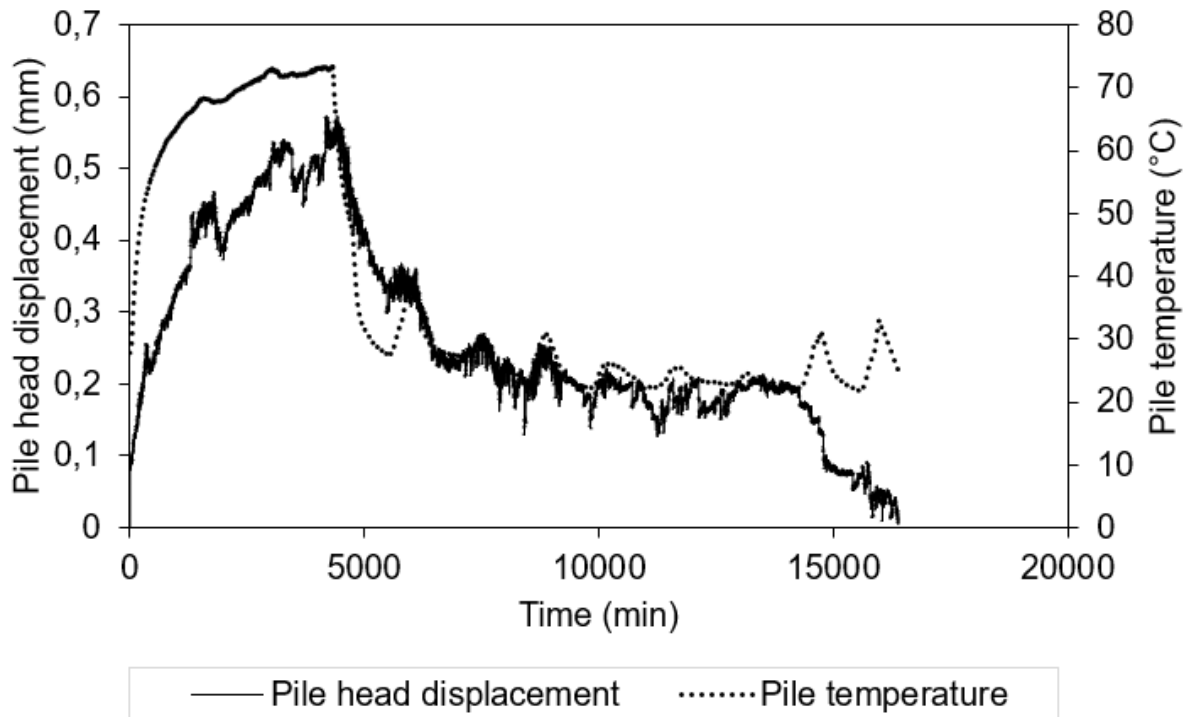


Figura 66 - Deslocamento no topo da estaca (mm) x variação de temperatura (°C) – TRT#3.

Simultâneo aos outros ensaios, foram realizados os cálculos para determinação do carregamento térmico para esse ensaio e estão apresentados na Figura 67. Cerca de 180 kN foram obtidos para carregamento térmico neste ensaio. O maior carregamento devido a maior carga térmica imposta, representando 19% da capacidade de carga da estaca.

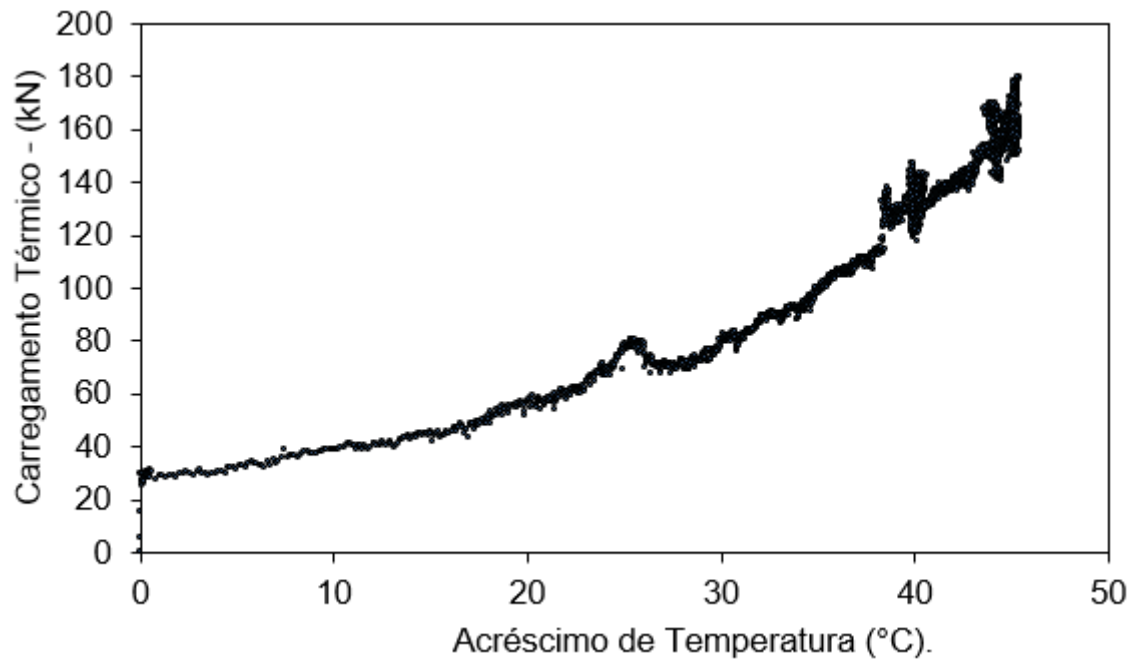


Figura 67 - Carregamento Térmico - TRT#3

4.5.4 – Comparativo 3 ensaios – Deslocamento no topo da estaca

Serão apresentados a seguir, a comparação entre os 3 ensaios. Se faz interessante notar, através da Figura 68, que nos dois primeiros ensaios foi imposto um mesmo gradiente de temperatura, porém, o ensaio 1 apresenta uma carga térmica de cerca de 50 % maior quando comparado ao ensaio 2. Isso ocorre pelo fato do ensaio 2 ter apresentado problemas técnicos no aquecedor, permitindo que ele chegasse ao mesmo gradiente de temperatura do ensaio 1 mas não permitiu que ele mantivesse essa temperatura pelo tempo necessário para que ocorresse a deformação total. O ensaio 3 apresentou maior carga térmica devida ao maior acréscimo de temperatura imposto neste ensaio.

Em nenhum dos 3 ensaios, a tensão térmica foi superior a 25% da capacidade de carga da estaca, mesmo no ensaio com maior temperatura imposta.

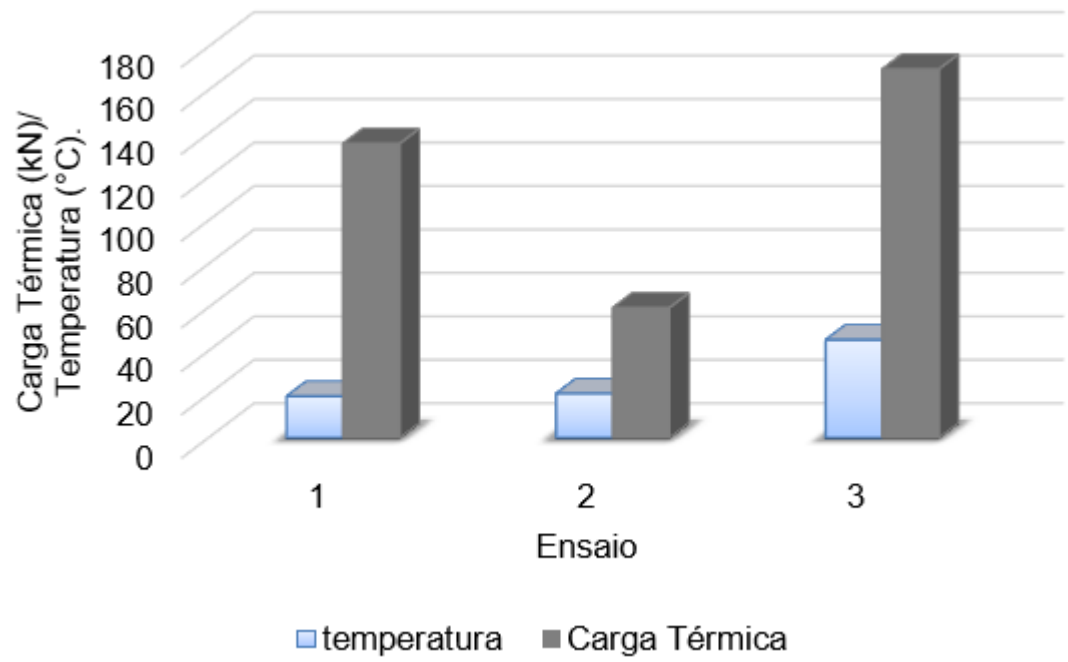
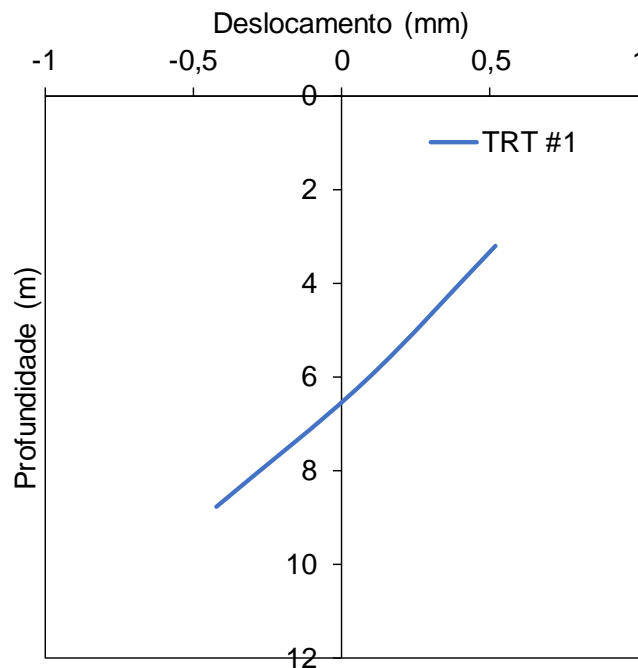


Figura 68 - Relação comparativa entre Carga Térmica e Temperatura entre os 3 ensaios.

4.6 – Análise do ponto nulo.

Quando aquecidas, as estacas térmicas tendem a se expandir gerando deformações e tensões termicamente induzidas. A expansão axial se dará em relação a um “ponto nulo” (Knellwolf et al., 2011), que é o ponto de deslocamento zero localizado a certa profundidade sendo dependente das camadas de solo circundante e das condições de restrição nas extremidades (Bourne-Webb et al., 2013). Logo, com o aquecimento da estaca a seção acima do ponto nulo terá deslocamento ascendente, aliviando a resistência lateral mobilizada pelo carregamento mecânico, a seção abaixo do ponto nulo terá deslocamento descendente.

A partir das medidas de deformação em cada sensor, foram determinados os incrementos de deslocamento relativos entre cada sensor em relação a profundidade em cada ensaio e estão plotados na Figura 69. Foi utilizada a equação 11. A localização do ponto nulo está localizada onde o gráfico cruza o eixo das ordenadas, mudando seu sinal.



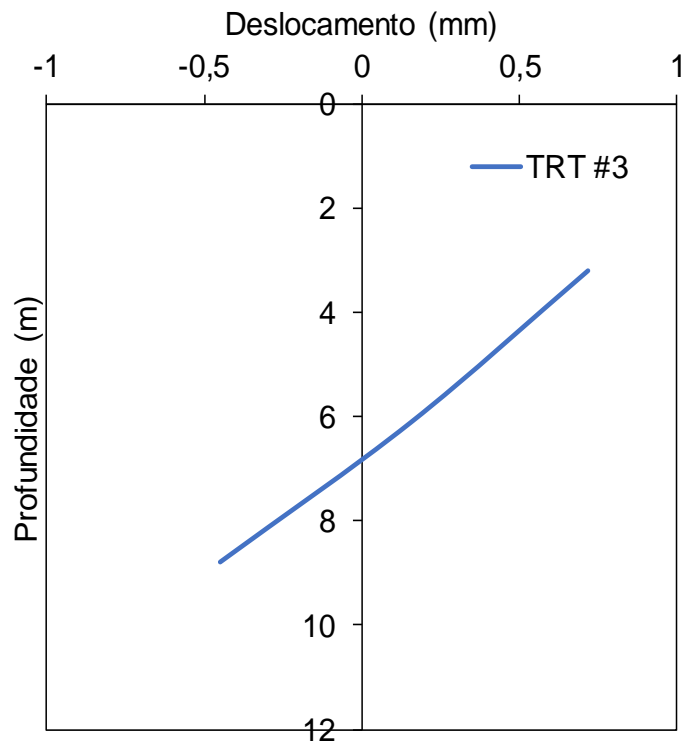
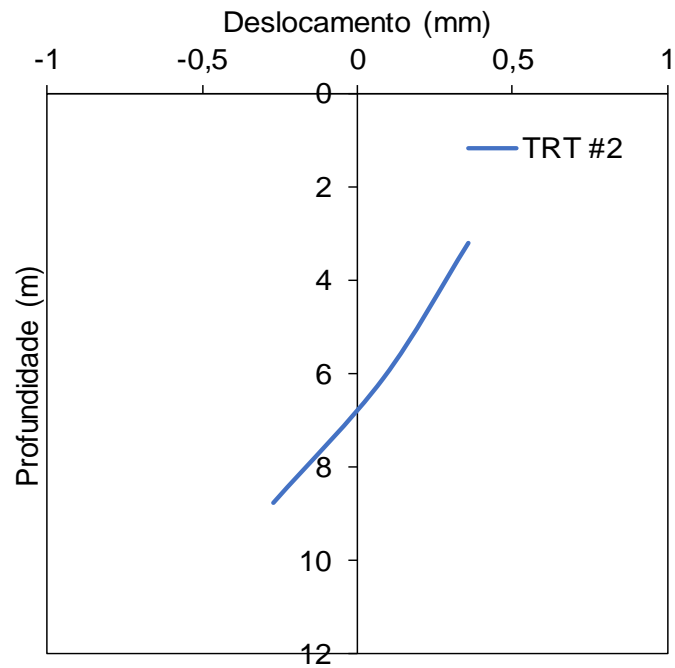


Figura 69 - Análise do ponto nulo para cada ensaio.

A comparação entre os três ensaios foi plotada na Figura 70, por interpolação é possível observar que o ponto nulo da estaca está localizado pouco abaixo da cota de 6 metros que é o ponto médio da estaca. Resultado bem interessante, visto que de acordo com Knellwolf et al. (2011), se a estaca fosse livre para se deslocar, sem a

presença de solo circundante e sem restrições em suas extremidades, o ponto nulo coincidiria com a cota média da estaca. Porém como as estacas geotérmicas estão embutidas no solo, o ponto nulo será diferente da cota média pois as deformações termicamente induzidas são influenciadas diretamente pelo solo circundante e pela condição de restrição das extremidades da estaca. No caso da estaca em estudo, o ponto nulo foi observado pouco abaixo do ponto médio da mesma, inferindo uma resistência lateral mobilizada maior na parte superior da estaca.

Outra conclusão que pode ser evidenciada a partir da Figura 70 é a condição estacionária do ponto nulo observada também por Mimouni e Laloui (2013), que, afirmam que a localização do ponto nulo permanece estacionária durante variação de temperatura. Tal afirmação leva a conclusão de que durante todo o carregamento térmico, ainda que haja variação de temperatura, o ponto permanecerá numa dada localização dependendo das características do solo circundante e das restrições nas pontas da estaca.

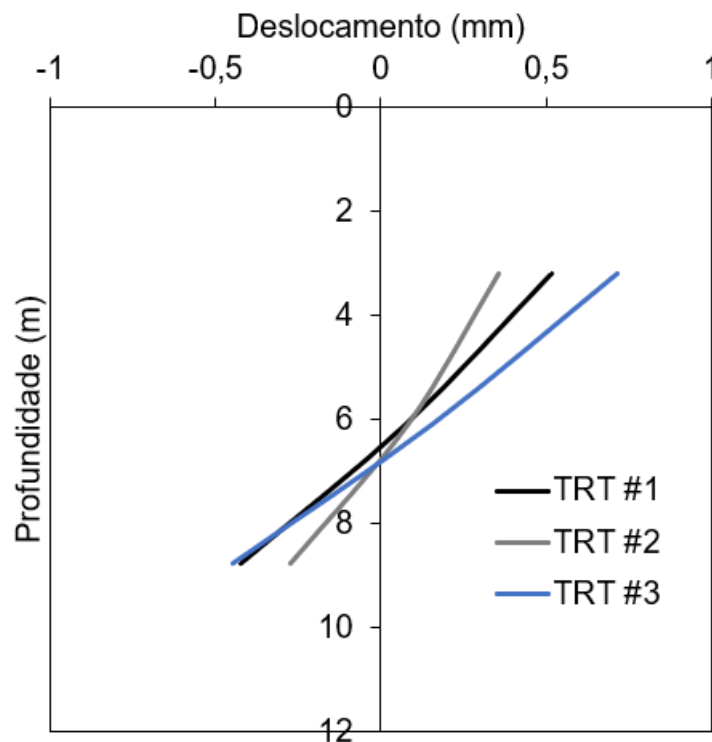


Figura 70 - Comparação entre os 3 ensaios em termos de ponto nulo.

5.0 - CONCLUSÃO

Três Testes de Resposta térmica foram realizados em uma estaca térmica com diferentes gradientes de temperatura. Deformação térmica, temperatura e deslocamento de topo foram monitorados e computadorizados. Conclusões relacionadas a análise dos resultados experimentais são informadas a seguir:

- A flutuação do nível do lençol freático interfere diretamente na condutividade térmica do solo, podendo mascara-la. Um nível de água mais elevado se relaciona com maiores valores de condutividade térmica e conseqüentemente maiores valores de carga térmica, observados no TRT#2.
- o Eurocode (CENTC 341 N525 2011) infere que solos com condutividade térmica acima de 1,7 W/mK são considerados de alta condutividade térmica, classificando o solo em estudo como de alta condutividade térmica.
- A estaca térmica se comportou como uma estaca semi-flutuante com deformações térmicas máximas nas extremidades devido a sua técnica de construção e a ausência de restrição em seu topo.
- A presença de uma camada de argila na metade inferior da estaca teve grande influência na restrição da estaca, apresentando valores de deformações térmica axial menores nesta profundidade possivelmente devido à baixa difusibilidade apresentada por esse tipo de solo.
- Deformações residuais pequenas após o resfriamento foram observadas nos dois primeiros ensaios. A maior temperatura imposta no terceiro ensaio levou a deformações residuais permanentes indicando comportamento termoplástico na camada de argila, induzido pelo aquecimento.
- Uma relação linear entre acréscimo de deformação térmica e acréscimo de temperatura foi notado em todas as profundidades, como previsto por Murphy Et al, (2015).
- O coeficiente de expansão térmica alcançou valores maiores em locais de maior deformação, localizados próximos ao topo e base da estaca, devido a pequena restrição de deformação. Não obstante, valores

menores de coeficiente de expansão térmica são condizentes com locais que apresentam menores deformações térmicas.

- Uma diminuição no coeficiente de expansão térmica foi observada durante os ciclos de aquecimento, possivelmente devido a consolidação térmica da camada de argila, juntamente com a densificação da areia na interface durante os ciclos de aquecimento impostos em cada teste.
- Os efeitos da mudança de temperatura no solo ao redor da estaca podem aumentar a resistência ao cisalhamento na interface devido ao aquecimento, o que pode ser explicado pela consolidação térmica, no solo argiloso.
- O carregamento térmico apresentou valores inferiores a 25% da capacidade de carga da estaca, porém, deve ser considerado para que ocorra um dimensionamento eficiente.
- O ponto nulo permanece estacionário mesmo após diferentes gradientes de temperatura serem impostos na estaca, de acordo com Laloui (2013).

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Austin, w. A., yavuzturk, c., spitler, j. D. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. *Ashrae transactions*, 2000, 106 (1): 365 – 379.

Akrouch, g. A., sánchez, m., & briaud, j. L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta geotechnica*, 9(3), 399–412.

Amatya, b. L.; soga, k.; bourne-webb, p. J.; amis, t.; laloui, I. (2012) thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Geotechnique*. 6:503-519.

Bandeira neto, I. (2015) estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado. Tese (mestrado em geotecnia) - são carlos - sp, universidade de são paulo - usp, 124 p.

Bourne-webb, p. J., amatya, b., soga, k., amis, t., davidson, c., & payne, p. (2009). Energy pile test at lambeth college, london: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 59(3), 237–248.

Bourne-webb, p. (2013) an overview of observed thermal and thermomechanical response of piled energy foundations. *Anais do european geothermal congress, pisa*.

Brandl, h. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.

Behbehani, F. and McCartney, J.S. (2020). “Impacts of unsaturated conditions on the ultimate capacity of energy piles.” *EUnsat 2020: The 4th European Conference on Unsaturated Soils*. Lisbon, Portugal. Jun. 24-26. pp. 1-6.

Chen, D. & McCartney, J.S. (2016). Parameters for load transfer analysis of energy piles in uniform non-plastic soils. *ASCE International Journal of Geomechanics*. 04016159-1-17.10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000873.

Brasil. Ministério de minas e energia. Resenha energética brasileira: Exercício de 2018: [Http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/resenha+energética+brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2](http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/resenha+energética+brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2) em 15/04/2018.

Colabone, r. O. Determinação da difusividade térmica de um solo incorporado Com resíduo de e.t.a. 2002. 76 f. Dissertação (mestrado em física) - Instituto de geociências e ciências exatas, universidade estadual Paulista, rio claro, são paulo. 2002.

Comitê europeu de normatização/comissão técnica (2011) geotechnical Investigation and testing — geothermal testing — determination of Thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger: Cen/tc 341 n525.

Di Donna, A. & Laloui, L. (2013). Advancements in the geotechnical design of energy piles. Proceedings of International Workshop on Geomechanics and Energy, Lausanne, Switzerland, pp. 26–28.

Di Donna, A. & Laloui, L. (2015). Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles. Int. J. Numer. Analyt. Methods Geomech. 39, No. 8, 861-888.

Di Donna, A., Ferrari, A. & Laloui, L. (2016). Experimental investigation of the soil concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization and behavior at different temperatures. Can. Geotech. J. 53(4): 659–672.

Faizal, M., Bouazza, A., Haberfield, C. & McCartney, J.S. (2018). Axial and radial thermal responses of a field-scale energy pile under monotonic and cyclic temperature changes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 144(10): 04018072.

Ferreira, M.S. (2017). Estacas geotérmicas: uso de energia sustentável e resposta termomecânica sob variação de temperatura. Dissertação de Mestrado.

Ghaaowd, I. & McCartney, J.S. 2018. Centrifuge modeling of temperature effects on the pullout capacity of energy piles in clay. DFI 43rd Annual Conference on Deep Foundations. Anaheim, CA. Oct 24-27. 1-7.

Gehlin, s. (2002). Thermal response test: method development and evaluation. Doctoral thesis. Lulea - norrboten, suécia, luleå university of technology, 184 p.

Goode, j.c. mccartney, j.s. (2015). "centrifuge modeling of boundary restraint effects in energy foundations". *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 141(8). *Granular matter*, 10(3), pp.197-207.

Ground loop heat exchangers. *Ashrae transactions*, 105(2), pp.475–485. *Interface. Canadian geotechnical journal*, 53(7), pp.1186–1194.

Kim, k.h. jeon, s.e. kim, j.k. yang, s. (2003). "an experimental study on thermal conductivity of concrete". *Cement and concrete research* (46).

Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical analysis of heat exchanger piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 137(10), 890-902.

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: 763-781.

Laloui, I., & di donna, a. (2011). Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Proceedings of the ice - civil engineering*, 164(november), 184–191.

Laloui, I., olgun, c. G., sutman, m., mccartney, j. S., coccia, c. J., abuel-naga, h. M., & bowers, g. A. (2014). Issues involved with thermoactive geotechnical systems: characterization of thermomechanical soil behavior and soil-structure interface behavior. *Dfi journal - the journal of the deep foundations institute*, 8(2), 108–120.

Lhendup, t.; aye, l.; fuller, r. J. (2014) in-situ measurement of borehole Thermal properties in melbourne. Elsevier. 73:285-293.

Loveridge, f. Powrie, w. (2013). "performance of piled foundations as thermal heat exchangers". 18^o international conference in soil mechanics and geotechnical engineering, paris, france, vol. 1, pp. 3371-3374.

Loveridge, f. Powrie, w. E nicholson, d. (2014). "comparison of two different models for pile response test interpretation. Acta geotechnica, vol9, pp.367-384.

McCartney, J.S. & Rosenberg, J.E. (2011). Impact of heat exchange on the axial capacity of thermo-active foundations. In: Han J., Alzamora D.E. (eds) Proc. Geo-Frontiers 2011 (GSP 211). ASCE, Reston VA, pp 488-498.

McCartney, J.S. & Murphy, K.D. (2012). Strain distributions in full-scale energy foundations. DFI Journal. 6,(2): 26-38.

McCartney, J.S. & Murphy, K.D. (2017). Investigation of potential dragdown/uplift effects on energy piles. Geomechanics for Energy and the Environment, 10(June): 21-28.

Murphy, K.D., McCartney, J.S. & Henry, K.S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. Acta Geotechnica 10(2): 179-195.

Murphy, k. D., mccartney, j. S., henry, k. S. (2014) impact of horizontal runout Length on the thermal response of full-scale energy foundations. Geo-congress 2014 technical papers, gsp 234, 2715-2724.

Monzó, p. (2011) comparison of different line source model approaches for analysis of thermal response test in a u-pipe borehole heat exchanger. Tese (mestrado em ciência e tecnologia) - estocolmo - suécia, kth school of Industrial engineering and management, 113p.

Moradshahi, A., Khosravi, A., McCartney, J.S. et al. Axial Load Transfer Analyses of Energy Piles at a Rock Site. *Geotech Geol Eng* 38, 4711–4733 (2020)

MORAIS, T. S. O.; TSUHA, C. H. C. Energy pile and ground temperature response to heating test: a case study in Brazil. *BULGARIAN CHEMICAL COMMUNICATIONS*, v. 48, n. E1, p. 115-119, (2016)

Nguyen, v. T., tang, a. M., & pereira, j. M. (2017). Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. *Acta geotechnica*, 12(4), 729–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0539-z>

Olgun, c.g. mccartney, j.s. (2014). “outcomes from the international workshop on thermoactive geotechnical systems for near-surface geothermal energy: from research to practice”. *The journal of the deep foundations institute*, vol. 8(2), p. 58-72.

Pan, shu-yuan et al. Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: barriers and strategies. *Renewable energy*, [s.l.], v. 132, p.19-32, mar. 2019. Elsevier bv.

Park, h., lee, s. R., yoon, s., choi, j. C. Evaluation of thermal response and performance of phc energy pile: field experiments and numerical simulation. *Applied energy*, 103, 12-24, 2013.

Sutman, m., olgun, c. G., & brettmann, t. (2015). Full-scale field testing of energy piles. *Ifcee*, 1638–1647.

Sutman, M., Olgun, C.G., & Laloui, L. (2019). Cyclic load–transfer approach for the analysis of energy piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 145(1): 04018101.

Souza, M. R, (2017). Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF. Dissertação de mestrado.

Vilela, m. (2004) Estudo de método experimental para determinar a Potencialidade do uso de energia geotérmica à baixa profundidade. Tese (doutorado) - são paulo - sp, universidade de são paulo - usp, 278 p.

Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Haberfield, C., Barry-Macaulay, D. & Baycan, S. (2014). Post temperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile. *J. Geotech. Geoenviron. Engng* 141(4): 04014125.

Yavari, n., tang, a. M., pereira, j. M., & hassen, g. (2014). A simple method for numerical modelling of energy pile's mechanical behaviour. *Geotechnique letters*, 4, 119–124.

You, s., cheng, x., guo, h., & yao, z. (2016). Experimental study on structural response of energy piles. *Applied thermal engineering*, 96, 640–651.

Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J.M. & Hassen, G. (2016). Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/ structure interface. *Can. Geotech. J.* 53(7): 1186-1194.

Yavari, n., tang, a. M., pereira, j. M., & hassen, g. (2016). Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay. *Géotechnique*, 66(11), 878–887.

Yun, t. S., & santamarina, j. C. (2007). Fundamental study of thermal conduction in dry soils. *Granular matter*, 10(3), 197–207.

Zhang, R., Lu, N., and Wu, Y.-S. (2012). "Efficiency of a community-scale borehole thermal energy storage technique for solar thermal energy." *Proc., GeoCongress 2012*, ASCE, Reston, VA, 4386–439

ANEXO I

