

RESPOSTA TERMOMECÂNICA DE ESTACA GEOTÉRMICA

MARINA DE SOUZA FERREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

ABRIL DE 2017

RESPOSTA TERMOMECÂNICA DE ESTACA GEOTÉRMICA

MARINA DE SOUZA FERREIRA

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

Orientador: Professor Fernando Saboya Albuquerque Jr.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

ABRIL DE 2017

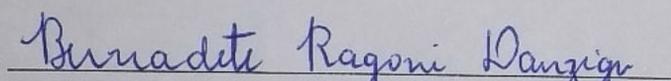
RESPOSTA TERMOMECÂNICA DE ESTACA GEOTÉRMICA

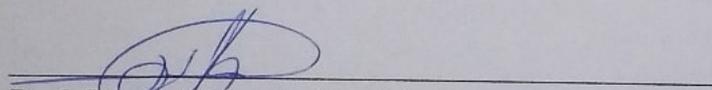
MARINA DE SOUZA FERREIRA

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

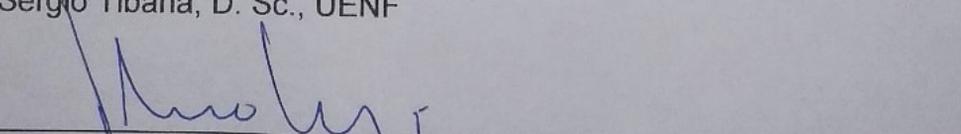
Aprovada em 18 de abril de 2017.

Comissão Examinadora:


Prof. Bernadete Ragoni Danziger, D.Sc., UERJ


Prof. Paulo César de Almeida Maia, D. Sc., UENF


Prof. Sérgio Tibana, D. Sc., UENF


Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr., D. Sc., UENF (orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo sustento diário e pelos pequenos milagres cotidianos que me fizeram chegar até aqui. Todas as minhas conquistas são fruto do cuidado dEle por mim. Agradeço por permitir essa jornada, com seus altos e baixos, mas que muito me ajudaram e me transformaram em alguém melhor e mais preparada para a minha profissão e para a vida.

À minha família, pela paciência nos momentos em que precisei me ausentar.

Gratidão é muito pouco para expressar tudo que os meus pais, Rogerio e Dorotéia, fizeram por mim a vida toda. Mas ainda assim não posso deixar de agradecer pela doação, por muitas vezes pensarem primeiro em mim e em meus irmãos antes deles, pelo incentivo de sempre, pelo amor, pelo carinho nos pequenos gestos e por sempre acreditarem em mim. Por serem exemplos de garra e de força na luta por objetivos. Ao meu irmão Matheus pela parceria e amizade diária, pela ajuda em momentos que eu precisei, pelas risadas constantes e almoços gostosos e à minha irmã Mônica, por tudo que já vivemos e viveremos juntas. Eu amo e sempre amarei vocês!

Estendo os agradecimentos aos meus avós maternos Natalino e Dorinha e aos meus avós paternos Ceney e Nairo (*in memoriam*) e a todos os meus tios, tias, primos e primas pelo amor, carinho e cuidado comigo em pequenos e grandes gestos ao longo dessa jornada. Vocês moram em meu coração!

Agradeço ao meu professor e orientador Fernando Saboya, por toda a contribuição ao longo do trabalho e pelo valioso conhecimento passado. Sempre me incentivando e acrescentando de maneira muito assertiva e leve.

À todos os demais professores e técnicos da UENF que estiveram sempre prontos a oferecer ajuda e conhecimento quando precisei.

Ao pessoal da Centrífuga Geotécnica, ao professor Tibana, aos técnicos Walber, Eberton, Matheus, Junior, Lucas e André, pela contribuição que foi

essencial em várias etapas deste trabalho e pelo convívio sempre muito agradável. Agradeço também à vovó (Izabel) pelo alegre convívio.

Agradeço aos colegas de turma do mestrado, em especial à Thamara, por todo o conhecimento trocado, pelas angústias compartilhadas e pela diversão, sobretudo na época das disciplinas. Com certeza esse ciclo teria sido bem mais difícil sem essa parceria.

À Alline Faial, por ter dado início a esse maravilhoso projeto, e por tudo que foi realizado por ela antes que eu iniciasse essa pesquisa.

Agradeço ao Oséias, doutorando pelo LAMAV, pela ajuda inicial importantíssima prestada no início dos trabalhos com o Arduino.

À Riscado Engenharia, pela essencial ajuda através da doação e confecção da estaca geotérmica que foi utilizada nesse estudo.

Agradeço aos meus amigos de Campos e Porciúncula, por me ajudaram, muitas vezes, sem perceber, nos momentos de alegrias e quando as coisas não estavam tão boas assim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento à Pesquisa (CAPES) pelo apoio financeiro concedido a mim no decorrer do mestrado.

Agradeço também a todos que passaram por mim nessa fase e que contribuíram de alguma maneira, mesmo nos pequenos detalhes, para que eu concluísse essa etapa.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Temperatura do Subsolo.....	9
2.2 Mecanismos de transferência de calor no solo.....	11
2.3 Estacas Geotérmicas.....	14
2.3.1 Mecanismos de transferência de calor entre o solo e a estaca.....	19
2.4 Teste de Resposta Térmica – TRT	20
2.5 Método da Teoria da Fonte Linear Infinita.....	27
2.6 Comportamento termomecânico da estaca submetida ao gradiente térmico.....	30
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Montagem do Ensaio.....	37
3.2 Realização do Ensaio.....	57
3.3 Análise dos dados obtidos com o ensaio - T. R. T.....	59
3.4 Análise dos Dados obtidos com o ensaio - Termomecânica.....	61
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	64
4.1 Teste de Resposta Térmica.....	64
4.1.1 Ensaio 1.....	64
4.1.2 Ensaio 2	68
4.2 Análise Termomecânica.....	72
4.2.1 Ensaio 1.....	72
4.2.2 Ensaio 2.....	80
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	90
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

RESUMO

A atual matriz energética brasileira é composta em maior parte por fontes não renováveis e emissoras de gases do efeito estufa. Dessa forma, é interessante para o desenvolvimento sustentável do país, que sejam estudadas e implantadas energias limpas e renováveis, tais como a energia geotérmica. A energia geotérmica vem sendo extraída mundialmente pela utilização de estacas geotérmicas e apesar disso, no Brasil, essa tecnologia é pouco conhecida e não se tem notícia de sua aplicação. Dessa forma, se torna importante avaliar a viabilidade deste sistema em território nacional para que se possa aplicá-lo de forma eficiente. Diante disso, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar termomecanicamente uma estaca geotérmica confeccionada no *campus* da UENF, em Campos dos Goytacazes/RJ com a realização de dois TRTs. Os dados obtidos com os TRTs foram avaliados pela Teoria da Fonte Linear Infinita de Calor e assim foram obtidas as propriedades térmicas e a temperatura média do solo local. Com a realização dos TRTs foram induzidas mudanças no seu estado de tensão e deformação da estaca. Sendo assim, essas mudanças também foram monitoradas e avaliadas. Em ambos os ensaios foram encontradas condutividades térmicas adequadas à utilização de estacas geotérmicas. Já a temperatura média não perturbada do solo foi de 29,4°C. Com relação ao comportamento mecânico, a estaca sofreu expansão com o aquecimento, o que gerou deformações principalmente de tração e tensões, sobretudo, compressivas. As maiores deformações de tração ocorreram próximas à cabeça e na ponta da estaca, onde havia menor restrição às deformações. Já as maiores tensões de compressão ocorreram próximas ao centro do fuste. Portanto, apesar das propriedades térmicas serem favoráveis à utilização das estacas geotérmicas, a temperatura do solo local inviabiliza a utilização desse sistema para o arrefecimento de ambientes. Já com relação ao comportamento mecânico, as magnitudes das deformações e tensões foram baixas se comparadas com a resistência da estaca.

Palavras-chave: Estaca Geotérmica, Teste de Resposta Térmica, Energia limpa, Energia Renovável, Avaliação Termomecânica.

ABSTRACT

The current Brazilian energy matrix is majority composed from non-renewable sources and sources of greenhouse gases. Therefore, it is interesting for the country's sustainable development the research of renewable energy such as geothermal energy. The geothermal energy is being extracted worldwide, but this technology is not widely known in Brazil. Thus, it is important to assess the feasibility of this technology on national territory where tropical climate is dominant. Therefore, the current experimental study focused on the thermo-mechanical response of energy pile at Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro at Campos dos Goytacazes/RJ, Brazil and two Thermal Response Tests (T.R.T) were carried out. The data from T.R.T were evaluated by Line Source Model to determine thermal properties of the energy foundation system. T.R.T caused changes in the energy pile stresses and strains. Consequently, these changes were monitored. In both tests there were obtained thermal conductivities suitable for the use of energy piles. The average undisturbed ground temperature was 29,4°C. Regarding thermo-mechanical behaviour, thermal pile dilates with heating, generating tensile strains and compressive stresses as well. The maximum tensile strains occurred near the tip, whereas maximum compressive stresses occurred at about mid-depth. Therefore, although appropriate thermal conductivities, the ground temperature seems not to be suitable for the use of thermal pile for cooling, however further studies are highly advisable. Regarding thermo-mechanical behaviour, magnitudes of strains and stresses did not exceed the resistance limiting values.

Keywords: Thermal pile, Thermal Response Test, renewable energy, thermo-mechanical behaviour

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da oferta brasileira de energia em 2014. (Resenha Energética Brasileira, 2014).....	1
Figura 2: Tubulação trocadora de calor disposta horizontalmente no solo e estacas energéticas para fins de climatização de uma residência. (Brandl, 2006).....	4
Figura 3: Variação da temperatura ao longo da profundidade de solo em diferentes épocas do ano. (Murphy et al., 2014).....	5
Figura 4: The One New Change, em Londres, Reino Unido. (Laloui e DiDonna, 2011).....	6
Figura 5: Número de estacas geotérmicas instaladas e a consequente quantidade de dióxido de carbono que deixou de ser emitida com as mesmas no Reino Unido. (Laloui e DiDonna, 2011).....	7
Figura 6: Variação da temperatura ao longo da profundidade de solo no inverno e no verão. (Brandl, 2006).....	10
Figura 7: Temperatura do solo no Campo Experimental da EESC/USP de São Carlos. (Bandeira Neto, 2015).....	10
Figura 8: Mecanismo de troca de calor entre o solo e a edificação. à esquerda é apresentado o arrefecimento e à direita, o aquecimento da edificação. (Gehlin, 2002).....	15
Figura 9: Ilustração dos circuitos primário e secundário e da bomba de calor em estacas geotérmicas. (Brandl, 2006).....	16
Figura 10: Esquema operacional de uma edificação com sistema de estacas geotérmicas. (Hamada et al., 2007).....	17
Figura 11: Tipos de trocadores de calor. (Hamada et al., 2007).....	18
Figura 12: Distribuição da velocidade do fluxo e da temperatura de um fluido transportador de calor em um tubo de trocas térmicas. (Brandl, 2006).....	20
Figura 13: Seção do furo trocador de calor com seus elementos. (Adaptado de CEN/TC 341 N525).....	21
Figura 14: Equipamentos necessários ao T. R. T e fluxos de calor possíveis. (CEN/TC 341 N525).....	23
Figura 15: Resultados obtidos com o TRT. (Lhendup et al., 2014).....	25

Figura 16: Gráfico que relaciona o logaritmo natural do tempo e a temperatura média do fluido. (Roth et al., 2004).....	30
Figura 17: Mudanças induzidas termicamente na tensão axial e associadas ao atrito lateral mobilizado entre o solo e a estaca. (Bourne-Webb et al., 2013).....	31
Figura 18: Efeito do carregamento térmico e do solo no comportamento de uma estaca submetida ao aquecimento e sem restrições em suas extremidades. (a) Perfis de deformação axial térmica; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya et al., 2012).....	34
Figura 19: Efeito do carregamento térmico e do solo ao redor no comportamento de uma estaca durante o aquecimento com imposição de restrição nas extremidades. (a) Perfis de deformação axial; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya et al., 2012).....	36
Figura 20: Localização da Centrífuga Geotécnica e da estaca geotérmica dentro do campus da UENF (Google Earth).....	37
Figura 21: Corpo de prova feito com o concreto da estaca geotérmica sendo ensaiado à compressão.....	39
Figura 22: Tubo PEX trocador de calor preso à armadura da estaca.....	41
Figura 23: Detalhe da conexão entre as tubulações de entrada e de saída.....	41
Figura 24: Modo de instalação do extensômetro do concreto.....	42
Figura 25: Extensômetro do concreto.....	42
Figura 26: Instalação do extensômetro da armadura.....	43
Figura 27: Aparência final do extensômetro da armadura após instalação.....	43
Figura 28: Disposição dos extensômetros e termopares ao longo do comprimento da estaca.....	44
Figura 29: Armadura, tubulação trocadora de calor e sensores prontos para serem inseridos na estaca.....	45
Figura 30: Execução da estaca geotérmica.....	46
Figura 31: Medidor de Vazão FP 2000 SERIES digital, Ômega.....	47
Figura 32: Equipamentos instalados para a realização do T.R.T.....	47

Figura 33: Resistência sendo preparada antes de sua instalação no tanque.....	48
Figura 34: Aparato pronto para ser instalado no tanque.....	48
Figura 35: Resistência de imersão instalada no interior do tanque.....	49
Figura 36: Equipamentos instalados para a realização do Teste de Resposta Térmica.....	50
Figura 37: Quadro de medição dos extensômetros e termopares.....	51
Figura 38: Leitor dos extensômetros e termopares da estaca. (Geokon).....	51
Figura 39: Termistor TH-44004 Series, Ômega.....	52
Figura 40: Termistores instalados na tubulação trocadora de calor.....	52
Figura 41: Arduino e seus componentes.....	54
Figura 42: Arduino com sua caixa de proteção e outros componentes do T.R.T.....	55
Figura 43: Tanque protegido por isopor e fiações ligadas no interior da Centrífuga.....	56
Figura 44: Leitor utilizado para mostrar as temperaturas ambiente e do fluido medidas pelo termopar.....	58
Figura 45: Temperaturas obtidas com o Teste de Resposta Térmica no Ensaio 1.....	65
Figura 46: Carga Térmica depositada no Ensaio 1.....	66
Figura 47: Regressão linear do Logaritmo natural do tempo versus Temperatura média do fluido para o Ensaio 1.....	66
Figura 48: Resistência Térmica ao longo do Ensaio 1.....	67
Figura 49: Temperaturas obtidas com o Teste de Resposta Térmica no Ensaio 2.....	69
Figura 50: Carga Térmica depositada no Ensaio 2.....	69
Figura 51: Regressão linear do Logaritmo natural do tempo versus Temperatura média do fluido para o Ensaio 2.....	70
Figura 52: Resistência Térmica ao longo do Ensaio 2.....	71

Figura 53: Temperaturas do concreto da estaca em cada dia do Ensaio 1.....	73
Figura 54: Temperaturas da armadura da estaca em cada dia do Ensaio 1.....	73
Figura 55: Incrementos de deformação ocorridos no concreto da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 1.....	75
Figura 56: Incrementos de deformação ocorridos na armadura da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 1.....	76
Figura 57: Obtenção dos coeficientes de expansão térmica no Ensaio 1.....	77
Figura 58: Coeficientes de expansão térmica mobilizados ao longo da profundidade da estaca no Ensaio 1.....	78
Figura 59: Tensões geradas na estaca com o Ensaio 1.....	79
Figura 60: Atrito lateral desenvolvido com o aquecimento da estaca no Ensaio 1.....	80
Figura 61: Temperaturas do concreto da estaca em cada dia do Ensaio 2.....	81
Figura 62: Temperaturas da armadura da estaca em cada dia do Ensaio 2.....	82
Figura 63: Incrementos de deformação ocorridos no concreto ao fim de cada dia no Ensaio 2.....	83
Figura 64: Incrementos de deformação ocorridos na armadura da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 2.....	85
Figura 65: Obtenção dos coeficientes de expansão térmica no Ensaio 2.....	86
Figura 66: Coeficientes de expansão térmica mobilizados ao longo da profundidade da estaca no Ensaio 2.....	87
Figura 67: Tensões geradas na estaca com o Ensaio 2.....	88
Figura 68: Atrito lateral desenvolvido com o aquecimento da estaca no Ensaio 2.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condutividade térmica de diversos solos. (Adaptado de Lhendup, 2014).....	12
Tabela 2: Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos (c) e das massas específicas (ρ) das frações constituintes do solo. (Colabone, 2002).....	13
Tabela 3: Capacidade calorífica volumétrica de diversos solos. (Adaptado de Lhendup, 2014).....	14
Tabela 4: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova do concreto da estaca geotérmica.....	39
Tabela 5: Resistência à tração indireta do concreto.....	40
Tabela 6: Temperatura média do solo não perturbado (Ensaio 1).....	64
Tabela 7: Temperatura média do solo não perturbado (Ensaio 2).....	68
Tabela 8: Comparação entre as propriedades térmicas obtidas com os ensaios 1 e 2.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

c	calor específico (J/kg.K)
C_1	coeficiente de expansão térmica do aço ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)
CEN	Comitê Europeu de Normatização
cP	centipoise
D	diâmetro da estaca (m)
d	raio da fonte de calor
$f_{s,mob,j}$	atrito lateral mobilizado (kPa)
G	densidade relativa do fluido
GPM	galões por minuto
H	profundidade da estaca (m)
in	polegadas
k	coeficiente angular da curva de $\ln(t) \times$ Temperatura Média
L_{hyd}	comprimento de entrada hidrodinâmico
L_{th}	comprimento de entrada térmico
m	massa do fluido (kg)
q	taxa de extração de calor por metro de estaca (W/m)
Q	vazão
Q_m	vazão em massa do fluido (kg/s)
r	distância do centro da tubulação até o ponto considerado
R	raio da tubulação
R_1, R_0	leituras de deformação no extensômetro ($\mu\epsilon$)

R_b	resistência térmica do furo ao redor da tubulação trocadora de calor (mK/W)
S_c	calor específico do fluido (J/kg.K)
S_{cv}	capacidade calorífica volumétrica (J/m ³ K)
T	temperatura do fluido
t	tempo
T.R.T	Teste de Resposta Térmica
TC	Comissão Técnica
T_e	temperatura do fluido na entrada da estaca
T_s	temperatura do fluido na saída da estaca
u	velocidade do fluido
V	viscosidade dinâmica do fluido (cP)
x	distância do início da tubulação ao ponto considerado
Δl	diferença de profundidade entre o sensor j e $j-1$ (m)
ΔT_f	diferença de temperatura entre o fluido naquele instante (dado pela média entre as temperaturas de entrada e de saída da estaca) e a temperatura média do solo não perturbado (K)
α	difusividade térmica do solo
$\varepsilon_{corrigida}$	deformação aparente corrigida ($\mu\varepsilon$)
$\varepsilon_{real,c}$	deformação real ocorrida no concreto ($\mu\varepsilon$)
ε_T	deformação térmica ($\mu\varepsilon$)
γ	constante de Euler
λ	condutividade térmica (W/mK)

μ	micro
ρ	massa específica (kg/m ³)
σ_T	tensão térmica (MPa)

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Dados elaborados pela EPE- Empresa de Pesquisa Energética juntamente com o Ministério de Minas e Energia e apresentados na “Resenha Energética Brasileira” de 2013 para 2014 mostraram que o crescimento pela oferta de energia foi de 3,1%. Nesse caso, esse comportamento foi atribuído principalmente às perdas térmicas na geração elétrica, que representou 1,3% dos 3,1% de expansão.

Além disso, a atual matriz energética brasileira é composta em grande parte por fontes não renováveis e emissoras de gases do efeito estufa. A Figura 1 mostra a atual matriz com dados apresentados na “Resenha Energética Brasileira” através de resultados do ano de 2014.

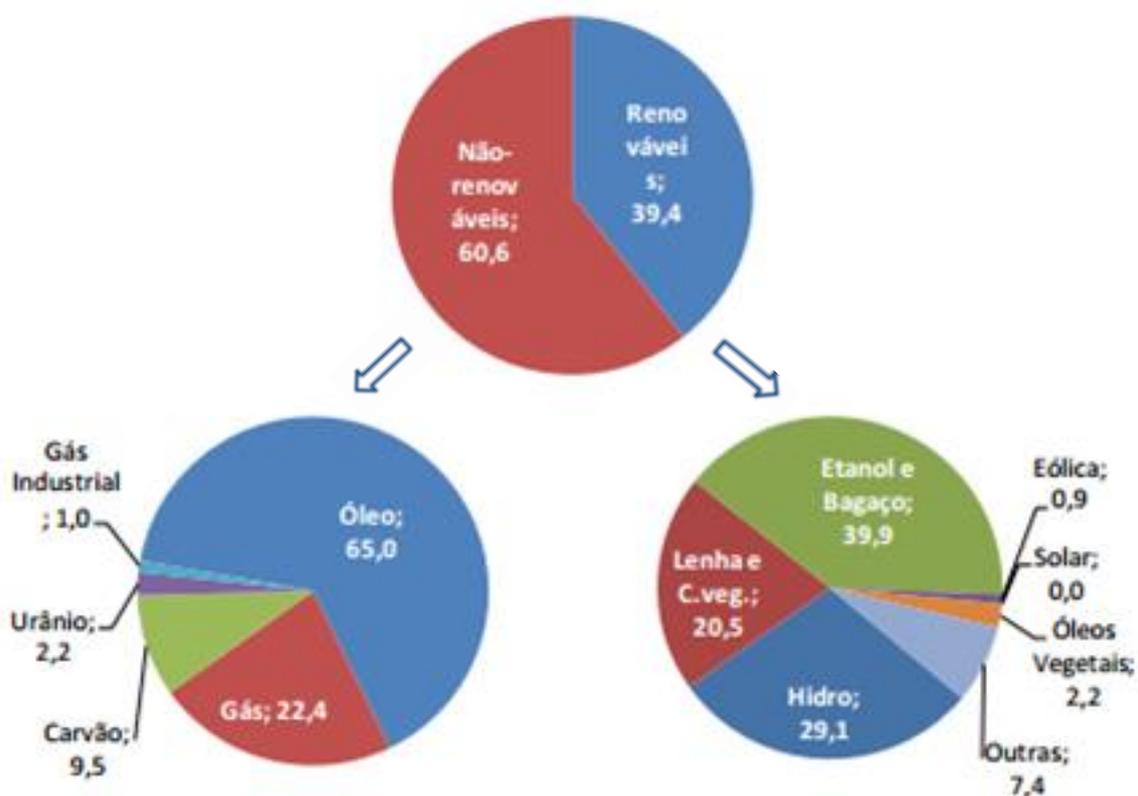


Figura 1: Distribuição da oferta brasileira de energia em 2014. (Resenha Energética Brasileira, 2014)

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 gera 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), hidrofluorcarbonos (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 o uso de HFCs até 2045, com uma redução a 20% dos 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.

Levando em conta a atual necessidade de se estudar e promover a implantação de energias renováveis, pode-se falar a respeito da energia geotérmica, já que ela se enquadra nesse quesito. Segundo Dickinson *et al.* (2004), a Energia Geotérmica é a energia térmica contida no interior da Terra que gera fenômenos geológicos em escala planetária, sendo também utilizada para indicar a parte da energia térmica disponível no interior do planeta que pode (ou poderia) ser retirada e explorada pelo homem. A energia geotérmica é originada da formação do planeta, do decaimento radioativo de minerais e da energia solar absorvida na superfície do planeta.

A energia geotérmica pode ser utilizada de variadas formas e sua utilização para a climatização de edificações tem crescido mundialmente. Há diversas maneiras de se extrair a energia geotérmica do solo para este fim e uma dessas maneiras é através da inserção de tubulações no subsolo para realizar trocas térmicas entre o solo e a edificação. 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. 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.

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 das 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. A Figura 2 foi elaborada por Brandl (2006) e mostra o esquema de uma pequena edificação onde foram utilizadas duas formas de extração de energia geotérmica: disposição da tubulação trocadora horizontalmente no solo (*Earth collector*) e estacas geotérmicas (*Energy piles*).

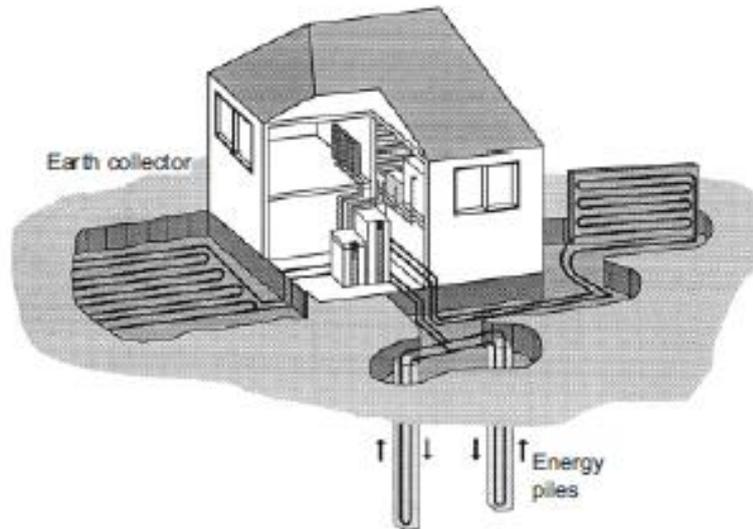


Figura 2: Tubulação trocadora de calor disposta horizontalmente no solo e estacas energéticas para fins de climatização de uma residência. (Brandl, 2006)

O uso das estacas geotérmicas se baseia no fato de que, a partir de alguns metros abaixo do nível do terreno, a temperatura do solo não sofre variação considerável com a mudança de estação, ou seja, mesmo que externamente à superfície esteja no verão ou no inverno, a temperatura do subsolo se manterá praticamente constante. A Figura 3, que apresenta as temperaturas encontradas no subsolo do Colorado, EUA, ao longo da profundidade e em diferentes datas, demonstra esse comportamento de estabilização das temperaturas do solo. Na legenda da figura, as datas estão em formato inglês, ou seja, com ordem em mês/dia/ano. Diante desse comportamento do perfil de temperatura do solo, pode-se utilizar a energia geotérmica para fins de arrefecimento no verão e aquecimento no inverno. Essa forma de utilização, que varia de acordo com a estação do ano, chama-se sazonal, como foi afirmado por Brandl (2006). Assim, é instalado um sistema de tubulações ligando a fundação à superestrutura, para que sejam feitas as trocas térmicas adequadas entre os dois elementos.

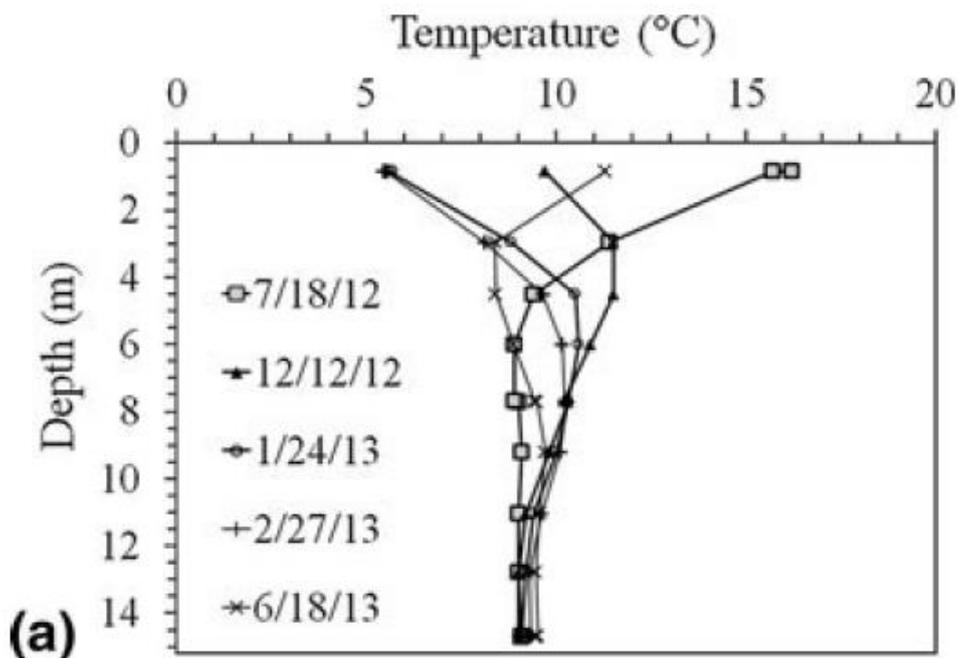


Figura 3: Variação da temperatura ao longo da profundidade de solo em diferentes épocas do ano. (Murphy *et al.*, 2014).

Mesmo apresentando grandes vantagens, as estacas geotérmicas começaram efetivamente a ser utilizadas há pouco tempo. Segundo Koene e Geelen (2000), a ideia de se utilizar tubos na fundação com a finalidade de extrair energia térmica do solo se iniciou na Suíça, em meados de 1990, onde o clima é predominantemente frio e o intuito das estacas geotérmicas seria aquecer as edificações.

As primeiras experiências envolvendo as estacas geotérmicas ocorreram na Alemanha e na Holanda em 1997, quando uma empresa local utilizou esse tipo de fundação em 10 residências. E a partir daí, outros projetos semelhantes foram sendo implantados em outros países.

Atualmente, países como a Alemanha e a Suíça já utilizam as estacas em escala comercial. Lá, de acordo com Laloui e DiDonna (2011), mais de 40 projetos já haviam sido construídos até 2011 com estacas geotérmicas, incluindo indústrias, casas, escolas e aeroportos.

Em Londres, no Reino Unido, há o *The One New Change*, uma edificação que foi construída com 192 estacas geotérmicas em circuito fechado. A Figura 4

mostra o *The One New Change* para que se tenha uma ideia do vulto da edificação.



Figura 4: *The One New Change*, em Londres, Reino Unido. (Laloui e DiDonna, 2011)

Segundo Brandl (2006), a experiência tem demonstrado que a utilização das estacas geotérmicas como fonte energética pode gerar até um terço de economia dos custos de aquecimento convencionais. Além disso, como essa fonte energética é limpa e renovável, surgem ainda mais atrativos para sua implantação.

A Figura 5 exemplifica as vantagens que as estacas geotérmicas podem fornecer quanto à diminuição de emissão de gases do efeito estufa. Nela é mostrado um rápido crescimento do número de estacas térmicas instaladas no Reino Unido de 2005 a 2010, juntamente com a correspondente preservação de emissão de CO₂. Em particular, os dados se referem à instalação do *Geothermal International Ltd*, que gera anualmente 9.2 MW para aquecimento e 8.7 MW para resfriamento. (Laloui e DiDonna, 2011)

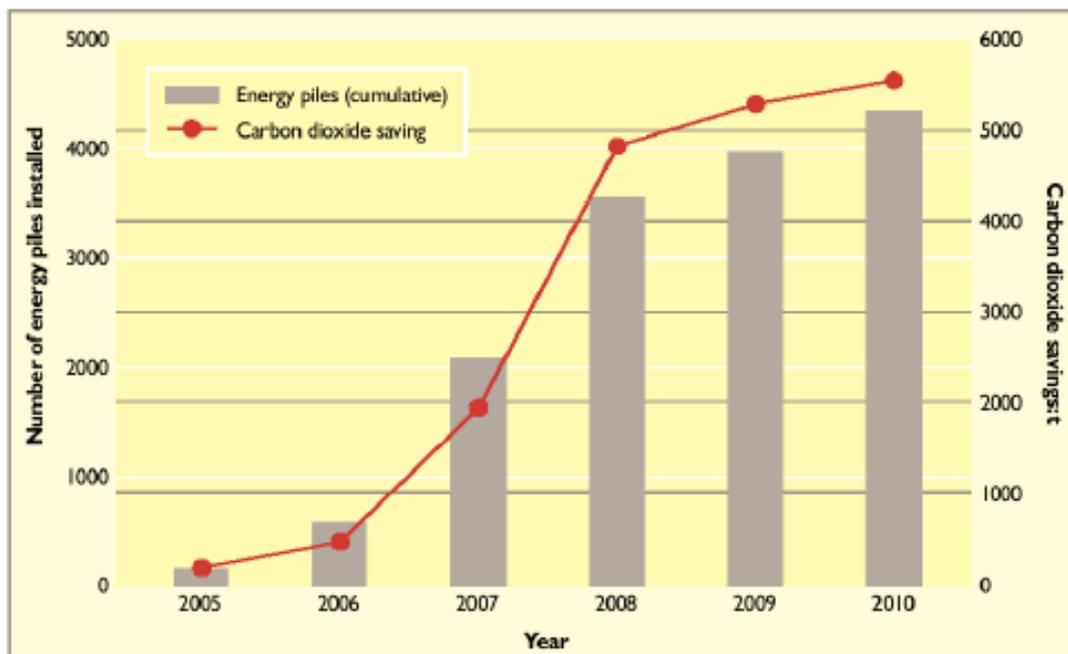


Figura 5: Número de estacas geotérmicas instaladas e a consequente quantidade de dióxido de carbono que deixou de ser emitida com as mesmas no Reino Unido. (Laloui e DiDonna, 2011)

Apesar das estacas geotérmicas já serem utilizadas em vários países, no Brasil essa tecnologia é pouco conhecida e ainda não se tem notícia de sua utilização efetiva. Para estimular a inserção desta tecnologia é preciso estudar a viabilidade desse sistema, levando em conta se o solo local é apropriado para este fim, se possui propriedades térmicas adequadas. Além disso, também é importante avaliar as consequências termomecânicas que ocorrerão com a imposição do gradiente térmico. Assim, será possível saber se esta finalidade secundária que é a climatização acarretará mudança no estado de tensão e deformação entre o solo e a fundação levando-a, porventura, à ruína.

Diante disso, com o intuito de proporcionar uma matriz energética mais sustentável e renovável, o estudo da viabilidade das estacas geotérmicas no território local se faz adequado.

1.1 Objetivos

Tendo como premissa a necessidade da ampliação e da modificação da matriz energética brasileira, o estudo da implantação da energia geotérmica através de estacas trocadoras de calor é o objetivo do presente trabalho.

Para a implantação das estacas geotérmicas no Brasil, é necessário conhecer as propriedades térmicas do solo local, a fim de avaliar se as trocas térmicas entre a fundação e o solo serão satisfatórias para seu devido fim, que é a climatização de ambientes. Para isso, será feito o Teste de Resposta Térmica – TRT que é o ensaio que fornecerá as propriedades térmicas do sistema trocador de calor.

Através do TRT será imposto um gradiente térmico à fundação e, nesse sentido, é necessário avaliar as mudanças que ocorrerão no âmbito das tensões e deformações da estaca, para que se possa saber se as trocas térmicas poderão comprometer a utilização da fundação em sua finalidade estrutural.

Para se chegar ao objetivo principal, pretende-se confeccionar uma estaca geotérmica no *campus* da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e montar todo o aparato necessário para a realização do Teste de Resposta Térmica, que irá fornecer alguns parâmetros térmicos importantes sobre o sistema. Essa etapa deve ser elaborada levando em conta as informações presentes na literatura e principalmente com base na norma europeia CEN/TC 341 N525.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Temperatura do Subsolo

A energia geotérmica é originada de muitos mecanismos que ocorrem em escala planetária, como a origem do planeta, o decaimento radioativo de minerais e pela energia solar absorvida na superfície terrestre e ela pode ser considerada como renovável. Além disso, devido à ocorrência desses vários mecanismos, o perfil de temperatura no interior do solo varia com a profundidade.

Segundo Brandl (2006), na maioria das regiões europeias, a temperatura do subsolo é relativamente constante a partir de uma profundidade entre 10 e 15 metros até profundidades de aproximadamente 50 m, mesmo se tratando de épocas sazonais distintas. Nessas profundidades, as temperaturas normalmente variam entre 10 e 15 °C, e essas magnitudes de temperatura viabilizam a utilização da energia geotérmica para a climatização de ambientes, tanto no inverno como no verão, de forma mais econômica, em países europeus.

Já em regiões tropicais, para o mesmo autor, a temperatura do subsolo em profundidades a partir de 10 a 15 metros, varia entre 20 e 25°C, o que viabiliza principalmente a utilização da energia geotérmica para o resfriamento das edificações. A Figura 6, elaborada por Brandl (2006), mostra um esquema simplificado da temperatura em função da profundidade tanto no verão como no inverno, de acordo com o que foi explicado anteriormente. Na imagem, é possível observar que a partir de uma profundidade entre 10 e 15 metros, há constância de temperatura.

Bandeira Neto (2015) também obteve a temperatura do solo em função da profundidade, em um estudo realizado em São Carlos, São Paulo. Esse estudo foi o primeiro voltado especificamente para as estacas geotérmicas no Brasil. Nesse caso, foram obtidos alguns resultados semelhantes aos apresentados por Brandl (2006) e outros resultados distintos, o que está ilustrado na Figura 7.

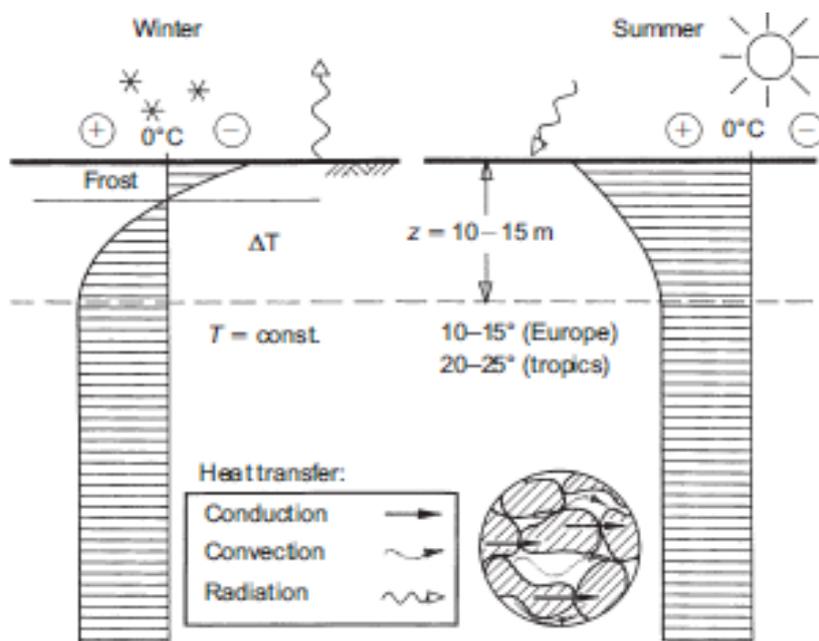


Figura 6: Variação da temperatura ao longo da profundidade de solo no inverno e no verão. (Brandl, 2006)

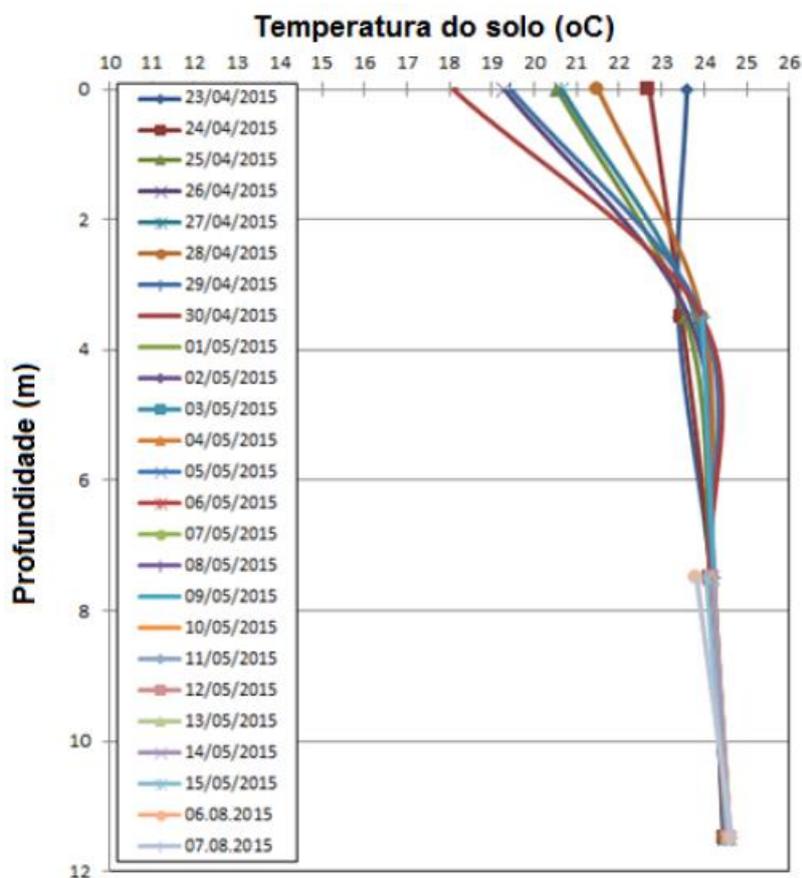


Figura 7: Temperatura do solo no Campo Experimental da EESC/USP de São Carlos. (Bandeira Neto, 2015)

Assim como Brandl (2006) apresentou que a temperatura constante do solo, em região de clima tropical, variava entre 20 e 25°C, Bandeira Neto (2015) observou uma temperatura de aproximadamente 24°C no subsolo. No entanto, com relação à profundidade de estabilização da temperatura, Bandeira Neto (2015) encontrou valores mais próximos da superfície. Nesse caso, antes dos 4 metros já havia pouca variação de temperatura, o que é uma condição ainda mais favorável à utilização das estacas geotérmicas em território brasileiro.

Além disso, 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 é compatível com a profundidade de estabilização encontrada por Bandeira Neto (2015).

2.2 Mecanismos de transferência de calor no solo

O solo é um material heterogêneo que se constitui de elementos sólidos, líquidos e gasosos que interagem entre si determinando seu comportamento mecânico e suas características estruturais.

Com relação ao comportamento térmico, os mecanismos de transferência de calor no solo podem ocorrer por condução, convecção e radiação. A condução é o mecanismo mais predominante em solos secos e acontece pelo contato entre as partículas constituintes do solo, dependendo, assim, das propriedades térmicas dos constituintes do solo, do contato entre as partículas e do grau de saturação. A convecção, por sua vez, ocorre com o movimento dos fluidos nos vazios do solo e é um importante mecanismo de transferência de calor na maioria dos solos úmidos. Já a radiação é praticamente desprezível no interior do solo, mas fornece calor a ele através das trocas térmicas que ocorrem com a atmosfera. Também pode ocorrer vaporização e condensação, trocas iônicas e congelamento e descongelamento em alguns casos.

Segundo Jury *et al.* (1991), a capacidade do solo de transferir e armazenar calor depende de suas propriedades térmicas e também das condições meteorológicas a que ele está submetido, o que controla a maioria dos demais mecanismos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no mesmo.

Os processos de transferência de calor por condução são influenciados principalmente por parâmetros como a condutividade térmica (λ) e o calor específico (c).

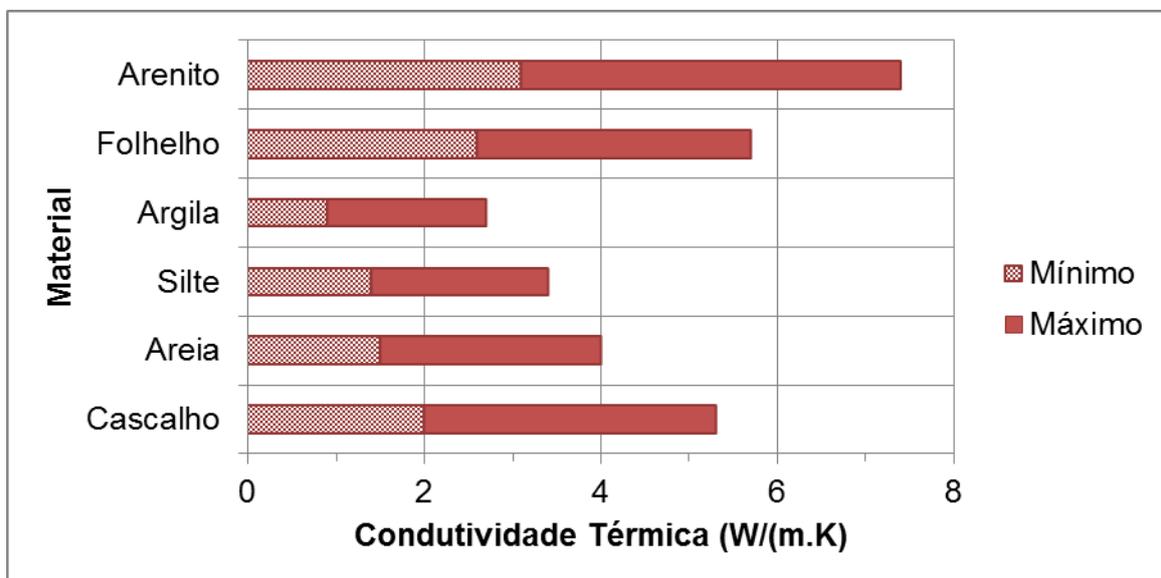
A condutividade térmica é a quantidade de calor que flui através de uma unidade de comprimento sob um gradiente de temperatura unitário, e demonstra a capacidade do solo em transmitir energia em forma de calor. Sendo assim, a mesma é dependente das proporções volumétricas das frações sólidas, fluidas e gasosas, do tamanho e arranjo dos sólidos e da interface de contato entre os sólidos e fluidos. Sua unidade no S.I é $W/(m.K)$.

Dessa forma, a condutividade térmica é fortemente influenciada pelo grau de saturação e pela densidade, e também pelos componentes mineralógicos e pelas propriedades químicas da água presente nos vazios do solo.

A Tabela 1, adaptada de Lhendup (2014), apresenta faixas de valores típicos de condutividade térmica de alguns tipos de solo.

Tabela 1: Faixa de valores de condutividade térmica de diversos solos.

(Adaptado de Lhendup, 2014)



O calor específico, por sua vez, pode ser definido como a quantidade de calor que deve ser fornecida ou retirada de cada grama de um determinado material, para gerar a mudança de sua temperatura em 1 °C. A unidade do calor específico no Sistema Internacional de Unidades é $J/kg.K$. Sendo assim, esse

parâmetro representa a capacidade do solo de atuar como um reservatório de calor.

O calor específico não depende da microestrutura do solo. Na maioria dos casos, é satisfatório calcular o calor específico de solos pelos calores específicos dos diferentes constituintes de acordo com sua proporção em volume, sendo eles frações orgânicas, minerais, de água ou de ar. Um material com calor específico alto possui uma capacidade maior de mudar de temperatura ao receber carga térmica. A Tabela 2 apresenta valores típicos de calor específico para cada fração constituinte do solo e foi apresentada por Colabone (2002). Na tabela também foram apresentadas as massas específicas dos constituintes.

Tabela 2: Valores típicos aproximados dos calores específicos mássicos (c) e das massas específicas (ρ) das frações constituintes do solo. (Colabone, 2002)

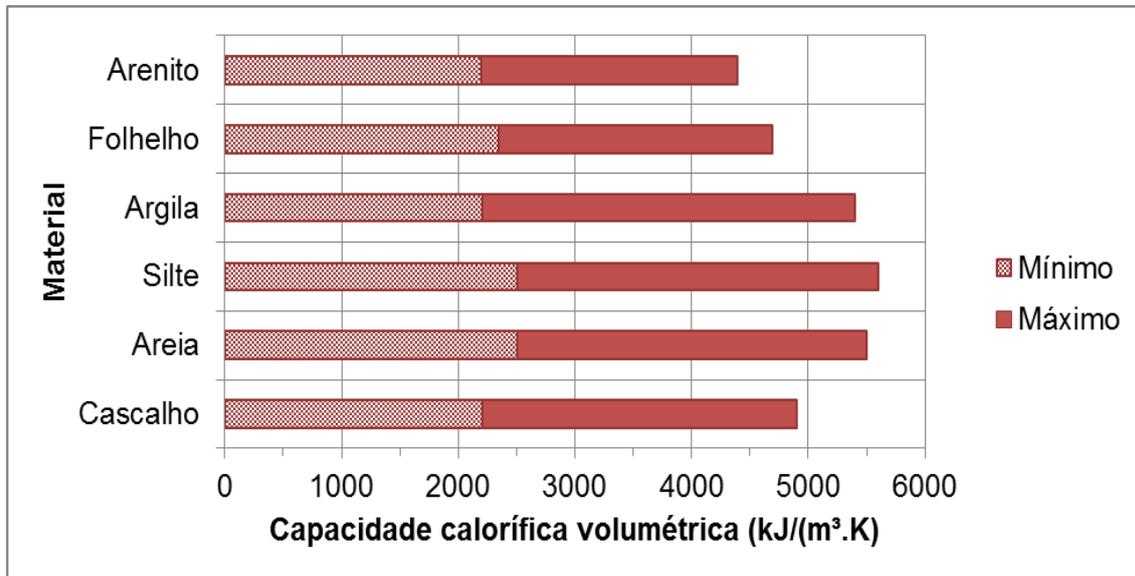
Frações	c (J/(kg.°C))	ρ (kg/m³)
Mineral	712	2650
Orgânica	1926	1400
Água	4186	1000
Ar	1005	1,3

Pela análise da tabela se pode ver que o calor específico do ar é baixo comparado às outras frações e pode ser desprezado. Já a matéria orgânica possui um alto calor específico, maior até que as partículas de argila e de areia, que formam a parte mineral do solo. A fração que possui o maior calor específico é a água.

A capacidade calorífica volumétrica, S_{CV} , é outro importante parâmetro na avaliação das trocas térmicas. Ele quantifica a quantidade de energia necessária para aumentar em 1°C, 1 cm³ de solo. A unidade da capacidade calorífica volumétrica no S.I é de J/m³.K.

A Tabela 3, adaptada de Lhendup (2014), apresenta intervalos típicos de S_{CV} para alguns tipos de solo.

Tabela 3: Faixa de valores de capacidade calorífica volumétrica de diversos solos. (Adaptado de Lhendup, 2014).



A difusividade térmica (α) é o parâmetro térmico que relaciona os dois outros parâmetros supracitados: a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica. A difusividade representa a rapidez com que o solo muda de temperatura quando está submetido a temperaturas extremas. 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.

2.3 Estacas Geotérmicas

As estacas geotérmicas, como apresentado, são elementos estruturais onde são implantadas tubulações trocadoras de calor com a finalidade de climatizar ambientes.

As tubulações trocadoras de calor são dispostas em um circuito fechado e ligam a fundação à superestrutura. No interior da tubulação, um fluido transportador de calor percorre todo o sistema realizando as trocas térmicas e o mesmo deve ser apropriado para esta finalidade. Caso as estacas geotérmicas não trabalhem em locais onde há risco de congelamento do fluido,

a água ou o ar podem ser utilizados para este fim. Dessa forma, através de um mecanismo de equilíbrio de temperatura, é possível extrair o calor do solo no inverno, caso a temperatura do solo seja maior que a temperatura da edificação e aquecer a edificação, e também retirar o calor da edificação no verão, e transportá-lo até o solo, caso a temperatura da edificação seja superior à do solo. Esse mecanismo é ilustrado na Figura 8 de Gehlin (2002).

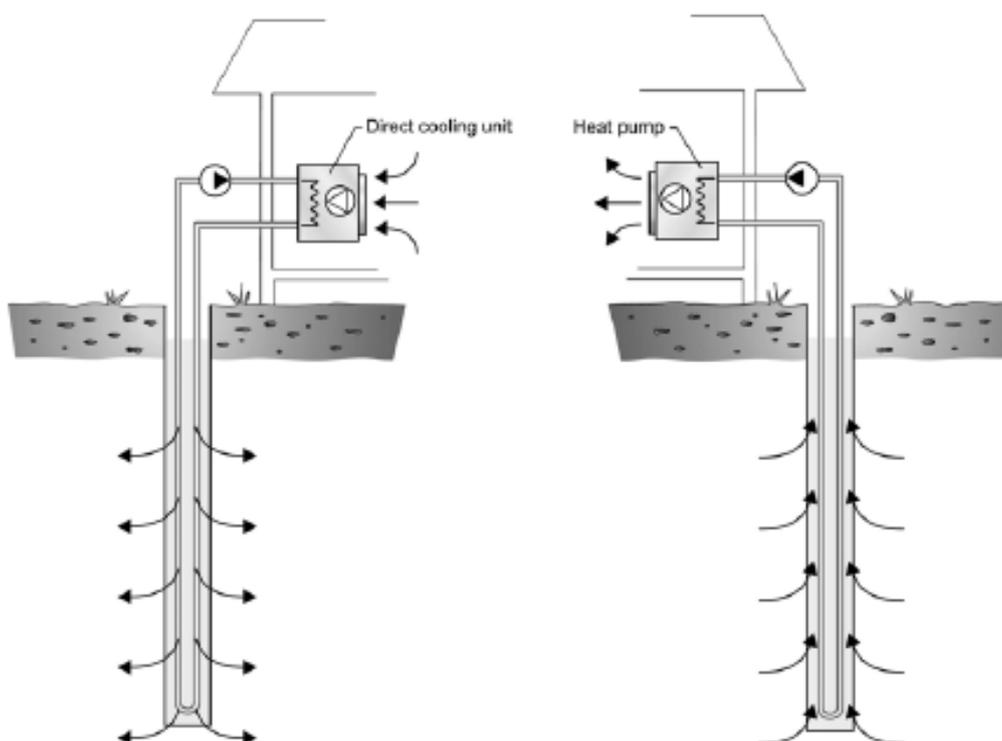


Figura 8: Mecanismo de troca de calor entre o solo e a edificação. à esquerda é apresentado o arrefecimento e à direita, o aquecimento da edificação. (Gehlin, 2002)

O sistema completo das estacas geotérmicas pode ser subdividido em dois circuitos: primário e secundário. O circuito primário contém as tubulações trocadoras inseridas nas estacas que ficam em contato com o solo. O circuito secundário, por sua vez, é constituído das tubulações que são inseridas na própria edificação gerando o aquecimento ou resfriamento do ambiente; essa inserção pode ocorrer em elementos como os pisos e as paredes da estrutura.

Geralmente, os circuitos primário e secundário são ligados entre si através de uma bomba de calor que aumenta o nível da temperatura, quando a finalidade é aquecer a edificação. Para se ter ideia do vulto do aumento, uma temperatura inicial entre 10 e 15 °C vai para um nível entre 25 e 35 °C. Já no caso em que o intuito é resfriar a edificação, a ligação entre os circuitos primário e secundário é feita diretamente. A divisão entre circuito primário e secundário para o caso de aquecimento da edificação (com a bomba de calor), está apresentada na Figura 9.

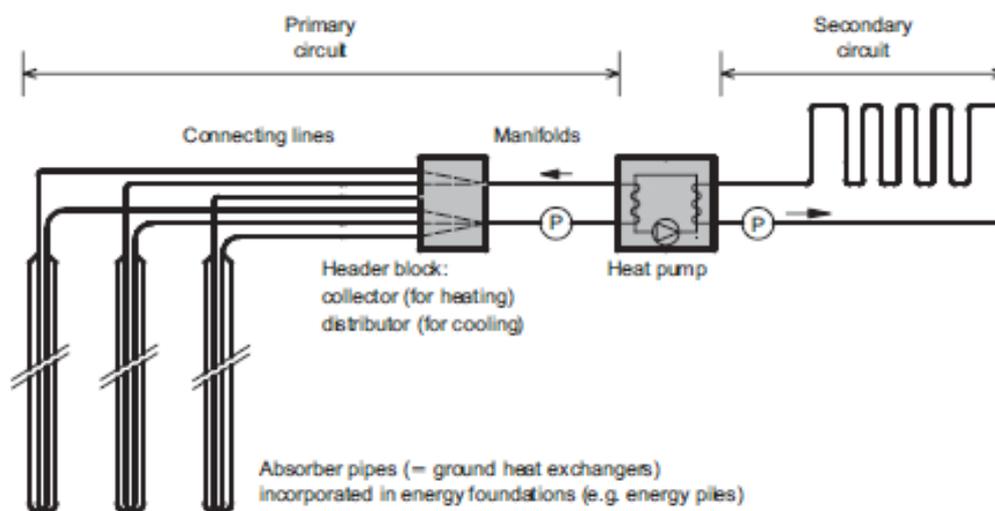


Figura 9: Ilustração dos circuitos primário e secundário e da bomba de calor em estacas geotérmicas. (Brandl, 2006)

A Figura 10, elaborada por Hamada *et al.* (2007), também mostra o esquema operacional de um sistema de estacas geotérmicas, onde as setas azuis representam os fluxos de temperatura entre o solo, a estaca e a edificação no verão e as setas alaranjadas mostram os fluxos no inverno.

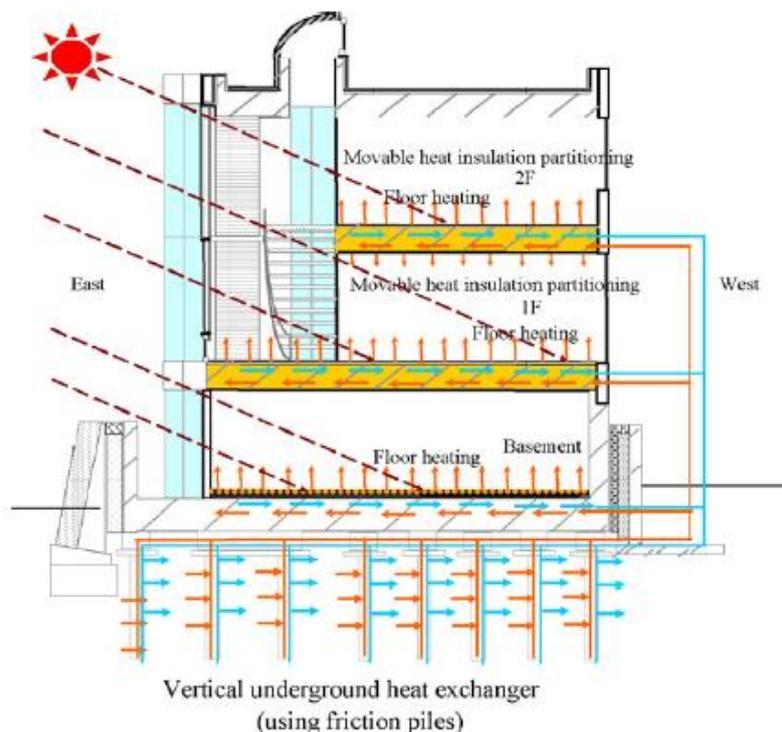


Figura 10: Esquema operacional de uma edificação com sistema de estacas geotérmicas. (Hamada *et al.*, 2007)

É importante ressaltar que, em território brasileiro, a demanda energética mais relevante é por resfriamento das edificações. Dessa forma, o fluido trocador de calor funciona de modo a retirar o calor proveniente da estrutura, levar até a região da estaca e ser resfriado pelas trocas térmicas com o solo, voltando à edificação com uma temperatura inferior, resfriando-a. Para isto, a ligação entre os circuitos primário e secundário pode ser feita de forma direta.

De acordo com Hamada *et al.* (2007), pode-se utilizar quatro métodos para dispor a tubulação trocadora de estacas geotérmicas. Esses métodos estão apresentados na Figura 11.

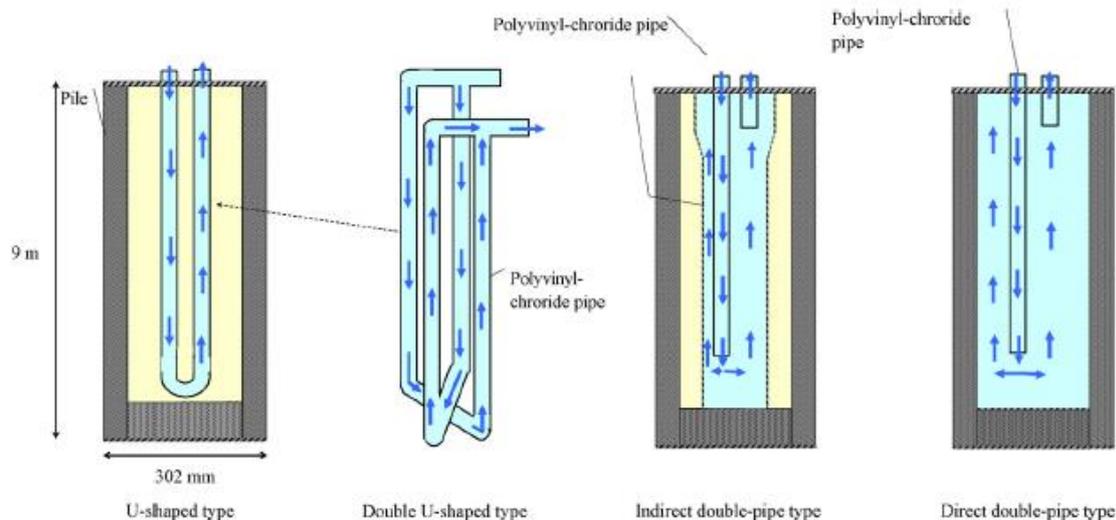


Figura 11: Tipos de trocadores de calor. (Hamada *et al.*, 2007)

Segundo o mesmo autor, o tipo de tubulação dupla direta é o mais eficiente para as trocas térmicas.

De acordo com Laloui *et al.* (2006), as vantagens das estacas geotérmicas no sentido ambiental são que esse sistema permite reduzir em até 50% as emissões de dióxido de carbono em edifícios e se utilizando de energia renovável; além de reduzir o transporte de energia, o que diminui o tráfego e também o risco de acidentes. Já Boennec (2008) indica que estes sistemas têm o potencial de oferecer até 80% de reduções globais de carbono.

Segundo Moel *et al.* (2010), os sistemas de energia geotérmica podem gerar economias significativas a longo prazo se comparadas com os sistemas convencionais e com um período de 5 a 10 anos de retorno de investimento dependendo de fatores como as propriedades térmicas do solo e o preço da energia no local de instalação, o que foi confirmado na Turquia.

Além disso, segundo Brandl (2006), para avaliar a viabilidade da utilização do sistema de estacas geotérmicas anteriormente ao projeto da fundação, pode-se utilizar as seguintes hipóteses quanto a quantidade de energia que pode ser extraída:

- (a) Estacas com diâmetro entre 30 e 50 cm: 40 a 60 W/m;
- (b) Estacas com diâmetro maior ou igual a 60 cm: 35 W por m² de área de contato com o solo;

- (c) Paredes diafragma, estacas barrete: 30 W por m² de área de contato com o solo.

Segundo o mesmo autor, as propriedades geotérmicas mais relevantes na avaliação da viabilidade de estacas geotérmicas são: condutividade térmica, calor específico, temperatura do solo e gradiente térmico.

2.3.1 Mecanismos de transferência de calor entre o solo e a estaca

De acordo com Brandl (2006) com relação às trocas térmicas de temperatura entre o solo e a fundação, é assumido que as paredes do tubo do trocador de calor tem a mesma temperatura do concreto em seu entorno e do solo. Com essa simplificação, o problema térmico complexo se reduz à transferência de calor entre o fluido transportador de calor e a tubulação trocadora de calor. Esse comportamento é essencialmente influenciado pelo tipo de fluxo do fluido, ou seja, sendo ele laminar ou turbulento. O tipo de fluxo pode ser determinado pelo Número de Reynolds.

Além disso, o fluxo no comprimento da tubulação pode ser descrito por duas zonas (Figura 12): zona de fluxo transiente e a condição de estado estacionário, onde o perfil térmico hidrodinâmico está em equilíbrio. Sendo que u e T são a velocidade e a temperatura no fluido, respectivamente. x , por sua vez, é a distância do início da tubulação ao ponto considerado e r é a distância do centro da tubulação até o ponto considerado. Já R é o raio da tubulação, L_{hyd} é o comprimento de entrada hidrodinâmico e L_{th} é o comprimento de entrada térmico. O fluxo transiente está representado pelos comportamentos à esquerda (*hydrodyn. entry length* e *thermal entry length*), e a condição estacionária representada à direita (*hydrodyn. stabilised* e *thermal stabilised*). Nesse último, a transferência de calor não muda se a condutividade térmica se mantiver constante. Em tubos trocadores de calor de estacas geotérmicas, o estado estacionário domina pois ele é atingido após uma pequena distância a partir do início da tubulação. Dessa forma, pode-se fazer considerações teóricas limitadas ao problema de fluxo e transferência de calor no estado estacionário (Adam e Markiewicz, 2002).

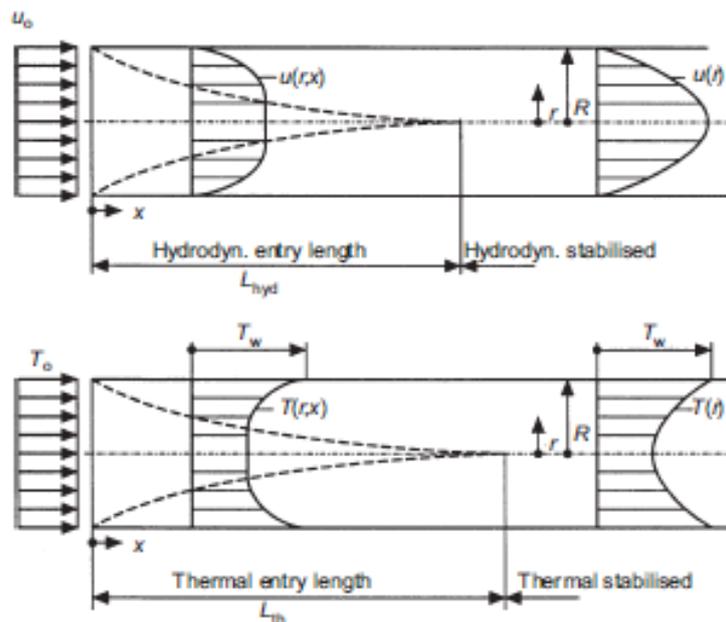


Figura 12: Distribuição da velocidade do fluxo e da temperatura de um fluido transportador de calor em um tubo de trocas térmicas. (Brandl, 2006)

Ainda de acordo com Brandl (2006), o regime de fluxo turbulento otimiza a transferência de energia, impulso e massa e este efeito aumenta com a velocidade do fluxo. Dessa forma, no projeto das estacas geotérmicas, é interessante que o fluido atinja esse regime durante a operação do sistema.

2.4 Teste de Resposta Térmica – TRT

Para o projeto de estruturas trocadoras de calor, é importante que se conheça as propriedades térmicas do solo, a fim de avaliar a viabilidade e eficácia do sistema em cada caso, antes que ele seja executado.

No princípio da utilização desta tecnologia, os ensaios para conhecimento das propriedades térmicas eram feitos em laboratório, com a retirada do solo local e subsequente análise. Posteriormente, começaram a ser elaborados ensaios in situ, que possuem como vantagem sobre os ensaios em laboratório, o fato de se considerar as condições reais do local, incluindo, por exemplo, as condições de fluxo subterrâneo.

Com esta proposta, surgiu o Teste de Resposta Térmica – T. R. T, que é um ensaio realizado em campo, e que possibilita a estimativa da condutividade

térmica e da resistência térmica do solo local, além de sua temperatura média. No caso de sistemas trocadores de calor em estacas, o T. R. T pode ser executado na própria estaca geotérmica, gerando uma economia e possibilitando conhecer as propriedades térmicas de todo o sistema trocador de calor que será utilizado, e não somente do solo.

O ensaio é prescrito em diversas literaturas internacionais e também na norma europeia CEN/TC 341 N525, cujo nome é *Geotechnical investigation and testing - Geothermal testing - Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger*. Tradicionalmente, o ensaio é realizado em um furo no local onde se deseja trocar calor e, nele, é feita a injeção (ou retirada) de calor a uma taxa constante. A Figura 13 mostra um esquema da seção do furo onde é instalado um tubo trocador de calor através do qual é feita a injeção ou retirada de calor. Na representação, é possível identificar a tubulação de entrada e de saída do fluido, a parede do furo, o espaço anelar de preenchimento do furo, a conexão entre as tubulações de entrada e de saída; tudo identificado pela legenda.

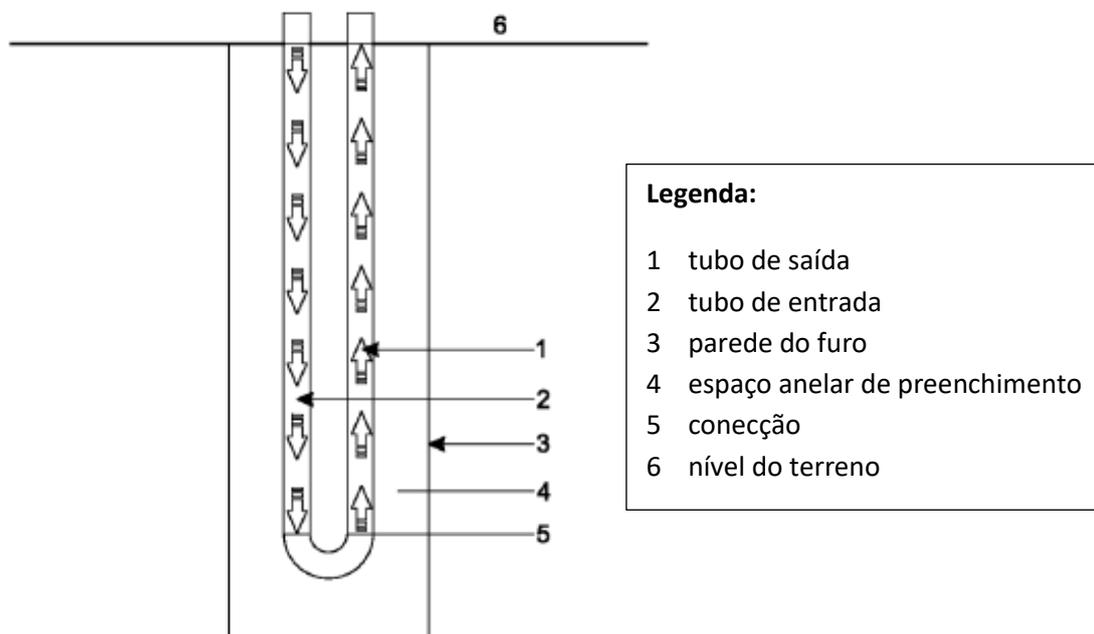
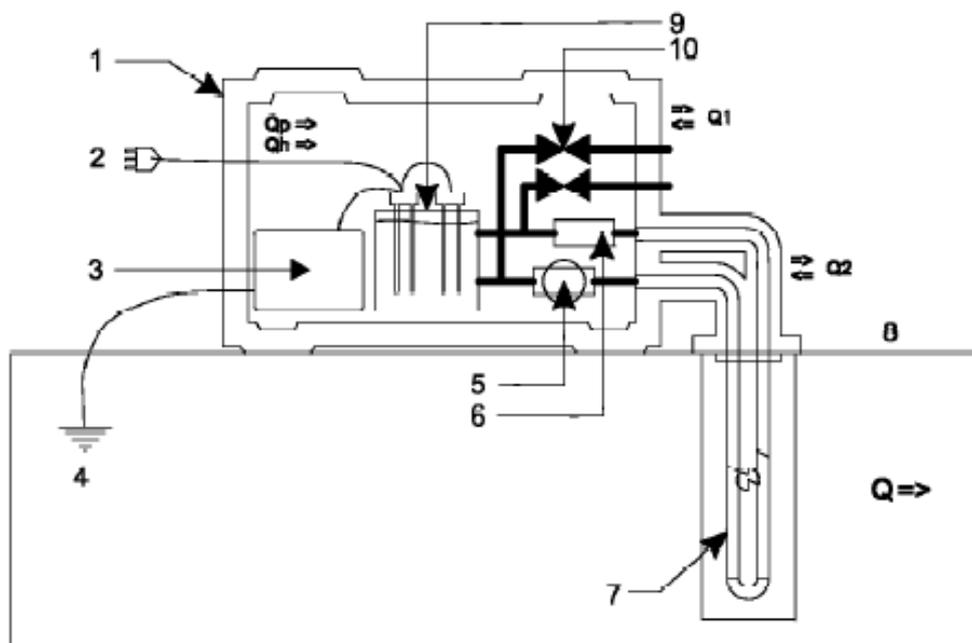


Figura 13: Seção do furo trocador de calor com seus elementos. (Adaptado de CEN/TC 341 N525)

Além da inserção da tubulação como mostrado na Figura 13, é preciso instalar outros equipamentos para a realização do ensaio. A Figura 14 apresenta um esquema desses aparelhos necessários. Nela, se pode ver que a tubulação trocadora de calor em formato de U que é colocada na estaca ou no próprio furo no solo, é ligada ao tanque onde o fluido deve ser aquecido. O aquecimento no tanque pode ser feito de várias formas, dentre elas, através da instalação de uma resistência elétrica de imersão. É comum que parte da tubulação trocadora de calor entre o tanque e a estaca fique exposta ao ambiente, sofrendo assim, influência das variações de temperatura externa. Nesse caso, é importante que se faça uma isolação térmica para que não haja influência externa na taxa de calor fornecida à estaca, ou que essa influência seja minimizada o máximo possível. O mesmo procedimento de isolação térmica deve ser feito ao tanque onde o fluido será aquecido. Além disso, é necessário que seja instalada uma bomba com potência suficiente para permitir o fluxo de fluido de acordo com as perdas de carga do sistema e em regime turbulento, para que as trocas térmicas sejam eficazes.

Para a realização do ensaio também é importante instalar os sensores capazes de medir a temperatura do fluido logo antes de sua entrada na estaca e logo após a saída da estaca de forma periódica, já que esses dados são essenciais no cálculo dos parâmetros térmicos do solo. Para tal fim, também deve-se prever um sistema de aquisição de dados capaz de coletar e armazenar esses dados, dentre outros que forem relevantes, como a temperatura ambiente, do fluido, etc. A temperatura ambiente não entra nos cálculos das propriedades térmicas do solo, no entanto ela pode mostrar se ocorreu influência da temperatura externa na carga térmica depositada no decorrer do ensaio.



Key

Q = heat B

Q = heat A – ($Q_1 + Q_2$)

$Q = (Q_h + Q_p) - (Q_1 + Q_2)$

Q heat flow

Q_1, Q_2 heat flow exchange to ambient air

Q_p heat flow of the pump

Q_h heat flow of the heating

1 insulation

2 electrical connection

3 data acquisition

4 earth spike to reduce interference on data recording

5 pump

6 temperature probes and flow meter

7 standard ground heat exchanger drilled to expected loop depth at site

8 ground level

9 water tank with heating elements

10 purge valves

Figura 14: Equipamentos necessários ao T. R. T e fluxos de calor possíveis.
(CEN/TC 341 N525)

Antes da realização do Teste de Resposta Térmica, é comum determinar a Temperatura Média do Solo não perturbado, que é um parâmetro relevante no projeto de estacas geotérmicas. Para isso, o solo circundante à fundação deve estar em equilíbrio térmico com o furo trocador de calor. A determinação desse parâmetro consiste em ligar a bomba de circulação, regular o fluxo em regime turbulento e permitir a circulação de água entre o tanque e a estaca por um período de 20 a 30 minutos com o registro periódico das temperaturas de entrada e de saída da estaca. Posteriormente, a Temperatura Média do Solo não perturbado é dada pela média aritmética entre todas as temperaturas de entrada e de saída medidas. Esse é o único parâmetro térmico onde não é feito

o descarte do período transiente inicial para os cálculos, já para os demais parâmetros, deve ser feito o descarte.

Após determinar a Temperatura Média do Solo não perturbado, pode-se prosseguir com o Teste de Resposta Térmica. Como os aparatos necessários ao ensaio já estarão funcionando em decorrência da medição da temperatura média do solo não perturbado, irá faltar ligar apenas a resistência elétrica para fornecer carga térmica ao ensaio.

A duração do ensaio irá depender das características do solo. No entanto, não há consenso a respeito do tempo necessário para se obter as propriedades térmicas do solo. Analisando autores como Lhendup *et al.* (2014), Austin (1998), Ghelin (1998), Smith & Perry (1995) e o Eurocode, observa-se que o tempo total de ensaio muda para cada um deles, no entanto, todos concordam que os dados iniciais do ensaio devem ser descartados e não levados em conta no cálculo das propriedades térmicas do solo. Isso se deve ao efeito transiente que ocorre no início do ensaio e é caracterizado por mudanças significativas nas temperaturas de entrada e de saída da estaca.

Com relação ao tempo total de ensaio, há uma variação entre 12 a 20 horas (Smith e Perry, 1995) a 70 horas (Lhendup *et al.*, 2014). Já a norma europeia (CEN/TC 341 N525 2011) cita um tempo mínimo de 48 horas para a realização do ensaio.

Já com relação ao tempo de descarte inicial dos dados, que condiciona o tempo mínimo de ensaio, há uma variação entre as 12 horas iniciais (Austin, 1998) e 20 horas (Lhendup *et al.*, 2014). Sendo assim, após a realização do ensaio, deve ser feita uma análise dos resultados para descartar dados suficientes para que não se considere o momento transiente no cálculo dos parâmetros.

Uma recomendação importante da Norma europeia é a de que também se deve fornecer uma carga térmica constante durante o ensaio.

Então, após a realização do Teste de Resposta Térmica serão obtidos, em função do tempo:

- As temperaturas de entrada e de saída do fluido na estaca de forma periódica no decorrer do ensaio;
- A carga térmica depositada no ensaio;
- A vazão;
- As condições ambientais (temperatura ambiente, etc)

A Figura 15 mostra um exemplo dos dados obtidos com o Teste de Resposta Térmica realizado por Lhendup *et al.* (2014)

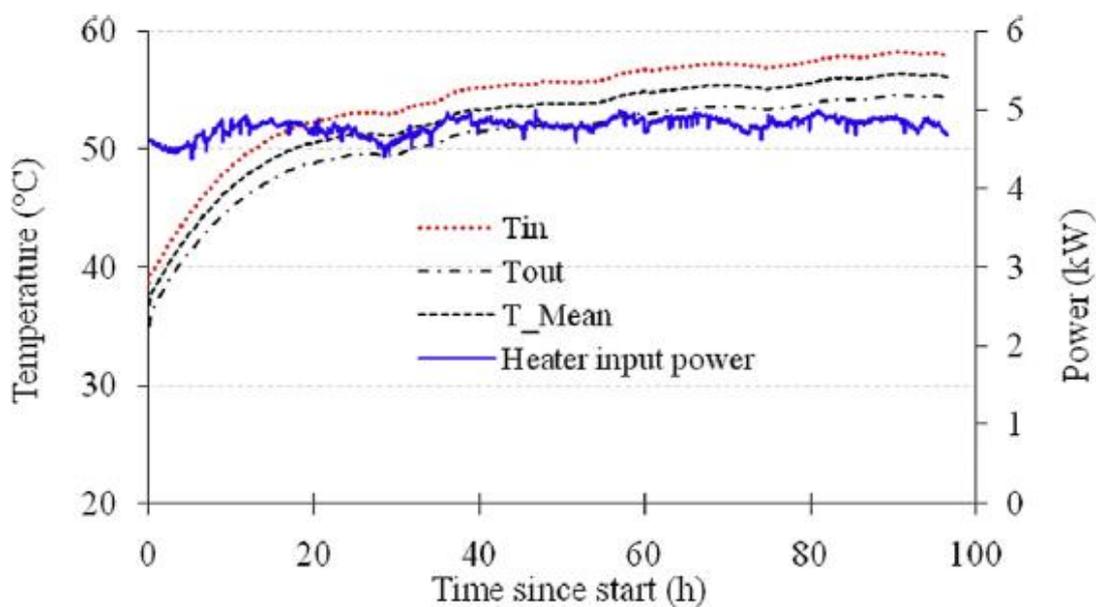


Figura 15: Resultados obtidos com o TRT. (Lhendup *et al.*, 2014)

Após a realização do TRT e com a obtenção dos dados do ensaio, é necessário adotar um método para o cálculo dos parâmetros geotérmicos. A escolha do método a se utilizar, deve levar em conta as características do ensaio, o nível de acurácia requerido e o tempo disponível para a obtenção dos parâmetros após a realização do ensaio.

A CEN/TC 341 N525 2011 diz que os resultados obtidos no TRT podem ser avaliados através da Teoria da Fonte Linear Infinita ou através de modelos

numéricos. No entanto, nos Estados Unidos, é recorrente que se utilizem do método do Teoria da Fonte Cilíndrica para tal fim.

Os métodos acima citados são subdivididos em dois grupos: analíticos e numéricos. Assim, o Método da Fonte Linear Infinita e o Método da Fonte Cilíndrica são os métodos analíticos mais relevantes. Os dois modelos analíticos requerem simplificações de várias suposições que levam em conta a geometria do furo e a configuração da tubulação trocadora de calor. Em ambos, a transferência de calor por convecção é desprezada, o processo térmico é simétrico no sentido radial a partir do eixo do furo de sondagem e a condução de calor é desprezada na direção longitudinal do furo de sondagem.

O Método da Fonte Linear Infinita descreve a fonte de calor, que é a tubulação trocadora de calor, como uma linha vertical infinita com uma taxa de transferência de calor constante q e descreve o campo de temperatura ao redor da fonte, que no caso em questão é o solo ao redor da estaca geotérmica, como uma função do tempo t e do raio d . A equação a seguir descreve o campo de temperatura em torno da fonte linear infinita.

$$T(d, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{d^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{d^2}{4\alpha t}\right) \quad (1)$$

sendo λ condutividade térmica do solo e α a difusividade térmica do solo. No presente método, a taxa de extração de calor q (W/m) ao longo do eixo vertical do furo é considerada constante, a temperatura do solo não é perturbada, os efeitos da ponta da fonte de calor são desconsiderados e o ambiente ao redor da estaca é considerado homogêneo e isotrópico. Esse método é o mais utilizado na avaliação dos resultados do T.R.T devido a sua simplicidade e à rapidez na obtenção dos parâmetros de interesse.

Já no Método da Fonte Cilíndrica Infinita, o trocador de calor é considerado como um cilindro infinito com fluxo de calor constante. O diâmetro do cilindro é dado através do diâmetro equivalente dos dois tubos trocadores de calor (de entrada e de saída). De acordo com Monzó (2011), o modelo de fonte linear

infinita é uma simplificação do modelo da fonte cilíndrica infinita. Além disso, o campo de temperatura para este modelo é descrito pela equação:

$$T^q(d, t) = \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} f(\beta) \cdot d\beta = \frac{q}{\lambda} \cdot G\left(\frac{\alpha t}{d^2}, \frac{d}{d_0}\right) \quad (2)$$

O Método da Fonte Cilíndrica é mais complexo que o da Fonte Linear e mais simplificado que os métodos numéricos. De acordo com Austin (1998), o Teorema da Fonte Cilíndrica é mais complexo de ser aplicado que o da Fonte Linear e, além disso, fornece resultados mais precisos. No entanto, o trabalho adicional que o primeiro proporciona normalmente não compensa, já que o da Fonte Linear já produz resultados satisfatórios.

Dessa forma, além dos métodos analíticos apresentados, os métodos numéricos são uma outra abordagem que pode ser utilizada para a interpretação dos dados obtidos com o T.R.T. Nos métodos analíticos, o trocador de calor é considerado como um desenho geométrico (linha ou cilindro), já com a utilização dos modelos numéricos, é possível representar o trocador de calor de forma mais detalhada, pela geometria exata do furo, com as propriedades térmicas do fluido transportador de calor, etc. Nesse caso, é feita a estimativa e a variação dos parâmetros que se deseja calcular (condutividade térmica e resistência térmica) até que se obtenham gráficos próximos ao obtido com o T.R.T, por retro análise. No entanto, a desvantagem desse modelo é que ele requer uma quantidade de dados bem maior que os modelos analíticos e é demandado mais tempo para sua aplicação.

Segundo Monzó (2011), os parâmetros mais relevantes no que tange ao desempenho ótimo do circuito geotérmico são a resistência térmica e a condutividade térmica do solo e eles devem ser calculados a partir do método adotado em cada caso. Na presente pesquisa, o método adotado será a Teoria da Fonte Linear Infinita, devido a sua simplicidade e confiabilidade dos resultados.

2.5 Método da Teoria da Fonte Linear Infinita

Como foi mencionado anteriormente, o campo de temperatura ao redor da fonte linear de calor, é descrito pela Equação 1.

Sendo q a taxa de calor por unidade de comprimento, λ a condutividade térmica do solo, α a difusividade térmica do solo, d o raio da fonte e t o tempo. Para valores altos de $\alpha t/d^2$, ou seja $\alpha t/d^2 > 5$, E_1 pode ser considerado como:

$$E_1\left(\frac{d^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{d^2}\right) - \gamma \quad (3)$$

sendo γ a constante de Euler que é igual a 0,5772.

Levando em conta a temperatura da fonte linear no raio do poço e introduzindo o efeito da resistência térmica do furo ao redor da tubulação trocadora de calor (R_b), pode-se dizer que a temperatura do fluido no instante t é igual a:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{d^2}\right) - \gamma \right] + q \cdot R_b + T_0 \quad (4)$$

A equação acima pode ser escrita em forma linear como

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (5)$$

sendo que k é o coeficiente angular da curva e pode ser dado por:

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (6)$$

ou seja, a condutividade térmica pode ser obtida pelo coeficiente angular da curva traçada plotando-se a temperatura média do fluido em função do logaritmo natural do tempo no decorrer do T.R.T. Sendo assim, a condutividade térmica pode ser expressa como:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi k} \quad (7)$$

Além disso, pode-se calcular a resistência térmica do furo em cada instante do ensaio através da equação:

$$R_b = \frac{\Delta T}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{d^2}\right) - \gamma \right) \quad (8)$$

Diante disso, com a realização do T.R.T serão obtidas as temperaturas de entrada e de saída do fluido em cada instante de tempo. Como a carga térmica aplicada ao ensaio não é transmitida em sua totalidade ao fluido transportador

de calor devido as perdas térmicas, é necessário calcular a energia térmica depositada no ensaio de fato. Isso pode ser feito através da equação:

$$Q = S_c \cdot Q_m \cdot (T_s - T_e) \quad (9)$$

sendo S_c o calor específico do fluido (J/kg.K), Q_m a vazão em massa (kg/s), T_s a temperatura do fluido na saída da estaca e T_e a temperatura do fluido na entrada da estaca (K).

Tendo sido calculada a carga térmica depositada no ensaio pode-se calcular a taxa de calor por metro de estaca, que é dada por:

$$q = \frac{Q}{H} \quad (10)$$

sendo H a profundidade da estaca em metros. A taxa de calor por metro, q , é dada em W/m e pode ser calculada a sua média aritmética após o ensaio completo.

Após a obtenção da taxa de calor por metro de estaca, parte-se para a plotagem do gráfico do logaritmo natural do tempo em segundos versus a temperatura média do fluido em Kelvin, que é dada pela média aritmética das temperaturas de entrada e de saída do fluido em cada instante de tempo. Um exemplo de uma curva que relaciona esses dois fatores é apresentado na Figura 16 e foi confeccionado por Roth *et al.* (2004).

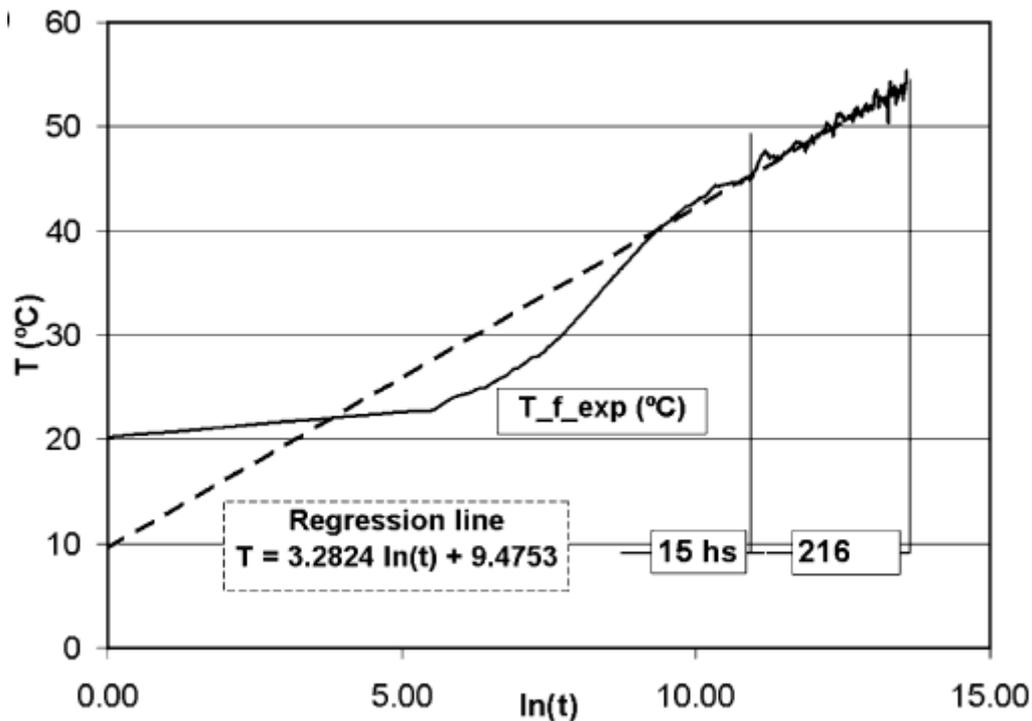


Figura 16: Gráfico que relaciona o logaritmo natural do tempo e a temperatura média do fluido. (Roth *et al.*, 2004)

Dessa forma, após descartar os dados do período inicial do ensaio onde ocorre o efeito transiente, é feita a regressão linear da curva para que se possa obter o coeficiente angular da mesma (k) para calcular a condutividade térmica do solo através da Equação 7.

Posteriormente, tendo calculada a condutividade térmica do solo, pode-se calcular a resistência térmica do furo em cada instante do ensaio.

2.6 Comportamento termomecânico da estaca submetida ao gradiente térmico

As estacas geotérmicas apresentam um grande avanço na forma de produzir energia. No entanto, os gradientes térmicos adicionados à estaca devem ser avaliados e estudados na etapa de dimensionamento da edificação, pois eles geram solicitações e deformações adicionais à estrutura e, portanto, devem ser incorporados para que a estrutura seja dimensionada adequadamente.

Segundo Bourne-Webb (2013), ao ser aquecida ou arrefecida, a estaca, juntamente com os outros elementos estruturais, irá sofrer uma expansão ou contração proporcional ao gradiente de temperatura aplicado. Este movimento, porém, poderá ser impedido pelo atrito lateral entre a estaca e o solo, pela base da estaca que está assentada sobre o solo e pelo topo da estaca onde a superestrutura está assentada, de acordo com a rigidez da ligação entre a estaca e esses elementos.

Os efeitos das solicitações decorrentes do aquecimento, resfriamento e das restrições ao redor da estaca, em um estudo elaborado por Bourne-Webb *et al.* (2009), estão apresentadas na Figura 17, de um ensaio em estaca termicamente ativa no *Lambeth College*, em Londres. A estaca tem 23 m de comprimento e 600 mm de diâmetro nominal, e foi instalada num solo de cerca de 5 m de depósitos superficiais granulares sobre argila rígida fortemente pré-adensada.

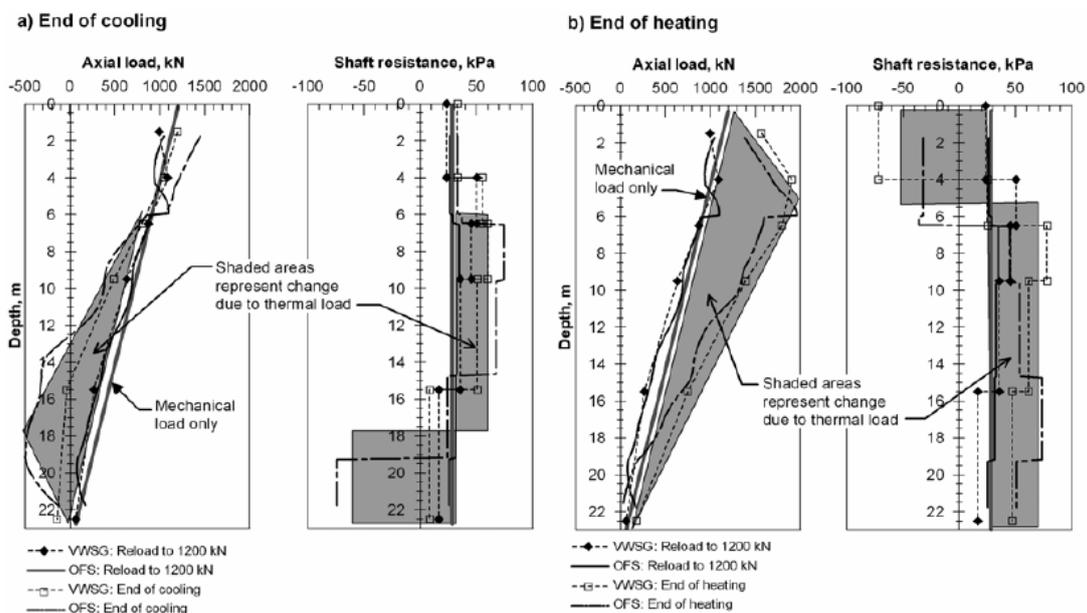


Figura 17: Mudanças induzidas termicamente na tensão axial e associadas ao atrito lateral mobilizado entre o solo e a estaca. (Bourne-Webb *et al.*, 2013)

Pela análise da Figura 17 e de acordo com Bourne-Webb (2013), pode-se observar que quando a estaca está submetida a carregamento mecânico apenas, a tensão interna reduz de forma aproximadamente linear ao longo da profundidade e o atrito lateral mobilizado é praticamente constante.

Então, quando a estaca foi submetida ao arrefecimento, Figura 17(a), foi gerada uma carga de tração no eixo da estaca (500 kN) e, com relação ao atrito mobilizado, houve um aumento na parte superior da estaca (30 kPa) e uma inversão no sinal na parte inferior da mesma (de 30 kPa a -60 kPa). Pode-se atribuir o comportamento do atrito mobilizado ao movimento da estaca em relação ao solo, já que, na parte superior, a estaca se move verticalmente para baixo, o que caracteriza atrito mobilizado positivo, e na região inferior da estaca, como ela se movimentava verticalmente para cima em relação ao solo, o atrito mobilizado se torna negativo.

Posteriormente, a estaca foi submetida ao aquecimento como mostrado na Figura 17(b), o que gerou o aparecimento de tensões axiais mais compressivas, dobrando na profundidade de cerca de 6 m para 2000 kN. O atrito mobilizado, por sua vez, se comportou de forma inversa ao arrefecimento, ou seja, foi negativo na parte superior (-50 kN) e positivo na parte inferior provocado pela expansão da estaca e, portanto, ela se movimentou para cima na parte superior e para baixo na parte inferior.

Dessa forma, a resposta termomecânica da estaca será dependente da mudança de temperatura aplicada à estaca e das restrições que a mesma possui para se deslocar termicamente. Idealizando uma situação onde a estaca não sofra restrição alguma, ocorreria deformação livre e as tensões induzidas seriam menores, já se o movimento dela fosse totalmente restringido, as tensões axiais na estaca aumentariam em proporção à mudança de temperatura e as deformações seriam menores, de acordo com Bourne-Webb *et al.* (2013).

Estudos feitos por Laloui e DiDonna (2011), também apontaram que quando a estaca está completamente livre para se deslocar, o estado de tensões não irá ser afetado pela mudança de temperatura, porém, os deslocamentos térmicos serão relevantes e poderão prejudicar o desempenho da edificação durante a sua utilização, ou seja, o estado limite de utilização será um fator importante a ser investigado. O outro extremo ao caso anteriormente descrito é aquele onde a estaca está completamente impedida de se deslocar. Nesse caso, o estado de tensões será alterado e, então, o estado limite último deve ser mais

cautelosamente verificado no dimensionamento da estaca para que não haja ruptura da mesma. Dessa forma, o autor concluiu que a solução ótima seria conciliar os dois casos extremos (restrição ou liberdade total da estaca), o que deve garantir tanto deslocamentos admissíveis para a estrutura, quanto tensões bem distribuídas nas estacas, mas nem sempre essa opção é possível e casos mais extremos devem ser levados em conta no dimensionamento.

Amatya *et al.* (2012) também corrobora a influência do solo lateral à estaca no desenvolvimento de deformações e tensões com o aquecimento. Ele menciona que a estaca se expande com o acréscimo de temperatura e que esse movimento será restringido pela interface solo-estaca. A restrição fornecida à estaca dependerá da rigidez do solo ao redor da fundação. Então, assumindo uma situação em que as extremidades da estaca estão livres pra se deslocar e que o atrito lateral é constante com a profundidade, ocorrerá uma deformação térmica mínima no meio da estaca e deformações máximas na extremidade da mesma. Então, o autor apresenta o que está na Figura 18 como resultado de diferentes magnitudes de restrição de atrito lateral, sendo que o Perfil A representa um atrito lateral alto e o Perfil B, um atrito lateral constante baixo.

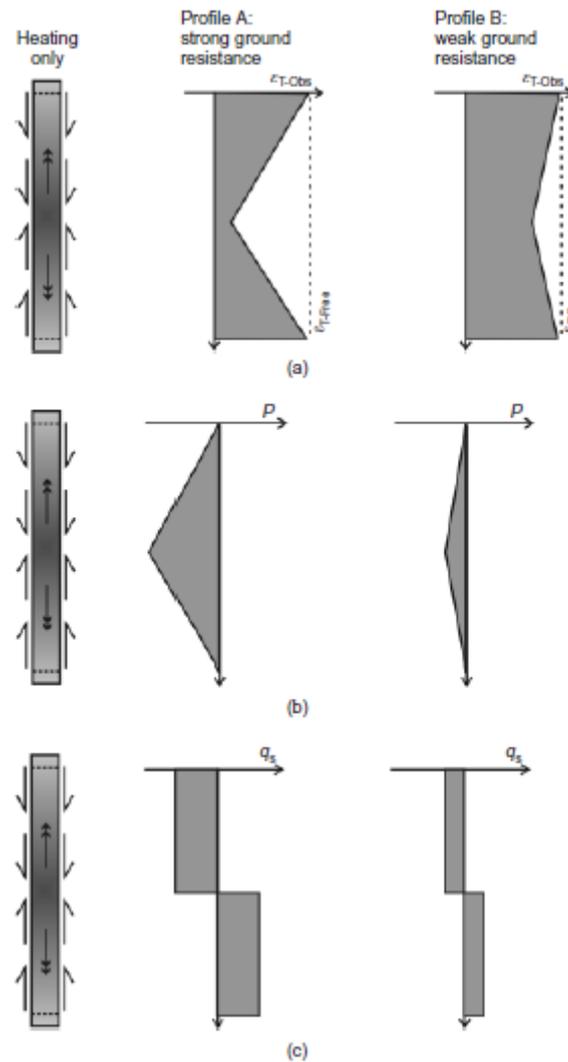


Figura 18: Efeito do carregamento térmico e do solo no comportamento de uma estaca submetida ao aquecimento e sem restrições em suas extremidades. (a) Perfis de deformação axial térmica; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya *et al.*, 2012)

Pela análise da Figura 18 pode-se observar que a deformação térmica mínima na metade da estaca é maior quando o solo tem atrito lateral baixo, ou seja, fornece pouca restrição. Já com relação à carga axial térmica máxima, que também ocorre à meia profundidade, ela é maior quando o solo tem alto atrito lateral, pois, dessa forma, ele fornece uma maior restrição às deformações e conseqüentemente ocorre uma maior geração de tensões internas na estaca, levando em conta que as cargas axiais são de compressão quando a estaca é submetida ao aquecimento. E, por fim, com relação ao atrito lateral, quanto maiores forem as restrições, maior será o atrito mobilizado com o aquecimento.

Amatya *et al.* (2012) também fazem considerações a respeito da influência que a rigidez fornecida nas extremidades (cabeça e ponta) da estaca tem na mudança de deformações, tensões e atrito lateral na mesma. Com relação à ponta da estaca, a rigidez da camada, o método executivo da estaca, a qualidade da limpeza da base antes da execução, dentre outros fatores irão afetar significativamente na restrição fornecida à estaca com sua dilatação. Já com relação ao topo, o principal mecanismo de restrição é fornecido pela ligação superestrutura-estaca, que pode ser mais ou menos rígida.

De qualquer forma, se alguma restrição for imposta à cabeça ou à ponta da estaca, serão desenvolvidas cargas de compressão adicionais, oriundas da restrição à deformação expansiva durante o aquecimento. As magnitudes das deformações e tensões, e também do atrito lateral mobilizado, irão variar com a rigidez relativa do elemento que está restringindo a estaca. Sendo assim, Amatya *et al.* (2012) apresentaram 3 perfis com características distintas, para exemplificar esse comportamento. O Perfil C representa uma estaca com restrição parcial tanto na cabeça como na ponta, o Perfil D representa a situação da estaca sem restrição na cabeça e com restrição parcial na ponta e o Perfil E representa a situação inversa ao D, com restrição parcial na cabeça e ausência de restrição na ponta da estaca. Diante disso, foi apresentada pelo autor a Figura 19.

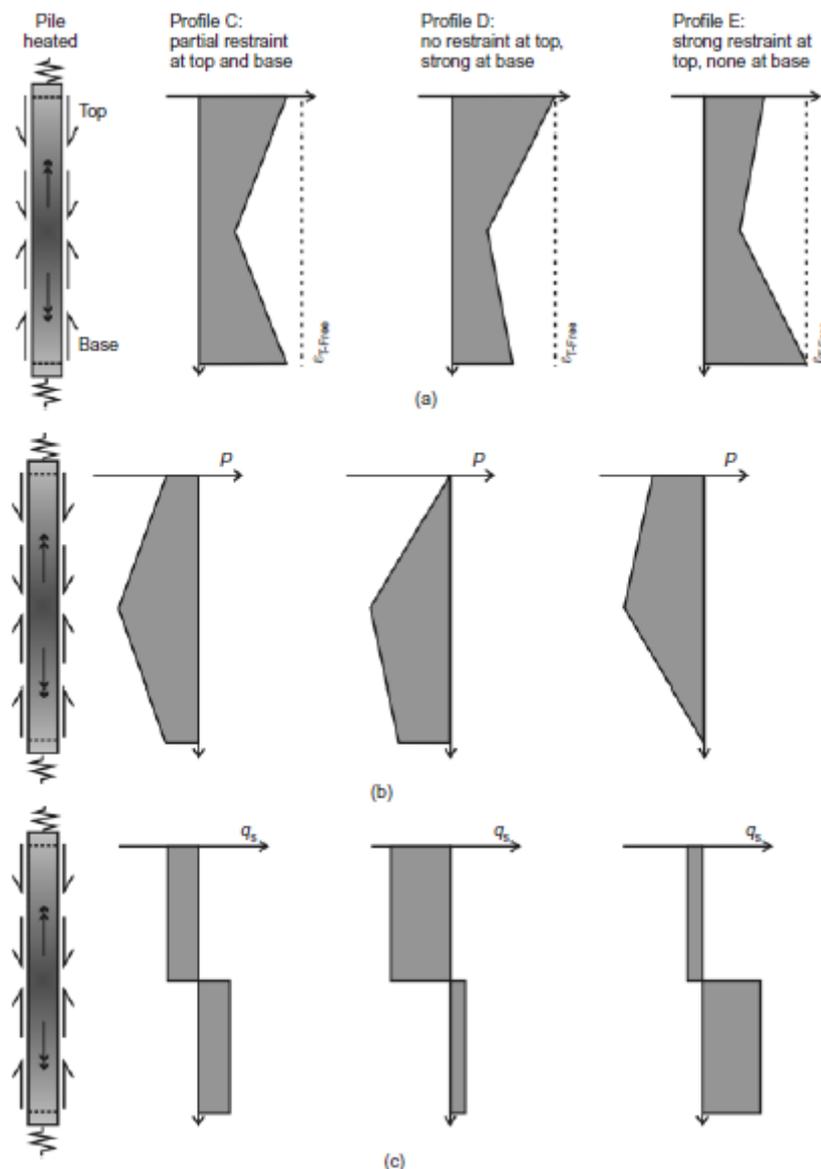


Figura 19: Efeito do carregamento térmico e do solo ao redor no comportamento de uma estaca durante o aquecimento com imposição de restrição nas extremidades. (a) Perfis de deformação axial; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya *et al.*, 2012)

Pela análise da Figura 19 pode-se observar que quanto maior for a restrição imposta a alguma das extremidades, menores serão as deformações axiais e conseqüentemente se desenvolverão maiores tensões térmicas axiais.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Montagem do Ensaio

Para que se pudesse realizar o Teste de Resposta Térmica e as subsequentes análises termomecânicas, foi confeccionada uma estaca geotérmica no *campus* da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF em Campos dos Goytacazes - RJ, no terreno ao lado da Centrífuga Geotécnica, como é mostrado na Figura 20.



Figura 20: Localização da Centrífuga Geotécnica e da estaca geotérmica dentro do *campus* da UENF (*Google Earth*)

A cidade de Campos dos Goytacazes está situada no norte do estado do Rio de Janeiro e apresenta clima tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação Köppen e Geiger de clima. Além disso, Campos dos Goytacazes possui média anual de temperatura de 24,1 °C, com temperatura média de 26,7° no verão. Com isso, é justificável a utilização de estacas geotérmicas com o intuito de arrefecimento neste local.

Dessa forma, a estaca executada para a presente pesquisa teve diâmetro de 40 cm e profundidade de 12 metros. Os Anexos A e B apresentam, respectivamente, as sondagens SPT 1 e 2 realizadas em setembro de 2013 em pontos próximos à estaca geotérmica, e juntamente a eles está o Anexo C, que apresenta a localização dos furos de sondagem. Outra sondagem realizada próximo à estaca geotérmica está apresentada no Anexo D.

A sondagem 1 é a mais próxima de onde a estaca geotérmica foi executada. Pela análise de ambas as sondagens, 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. Além disso, nas sondagens 1 e 2 o lençol freático foi encontrado na profundidade de 5,75 m e na sondagem 3 isso ocorreu próximo aos 4 metros. É importante salientar que o lençol freático se localiza muito próximo ao rio Paraíba do Sul e sofre grande influência das variações de nível do rio. Dessa forma, seu nível sofre variações no decorrer do ano.

O concreto utilizado na confecção da estaca foi um concreto alto adensável e cujo agregado graúdo foi brita 0. O mesmo foi ensaiado à compressão axial, com moldes cilíndricos de 7,5 cm de diâmetro e 15 cm de altura em uma máquina Shimadzu UH-1500kNI através de quatro corpos de prova, e obteve-se uma média de 29,6 MPa de resistência à compressão. A Figura 21 mostra um dos corpos de prova sendo ensaiado à compressão e a Tabela 4 mostra os valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade para cada corpo de prova individualmente e a média dos quatro.

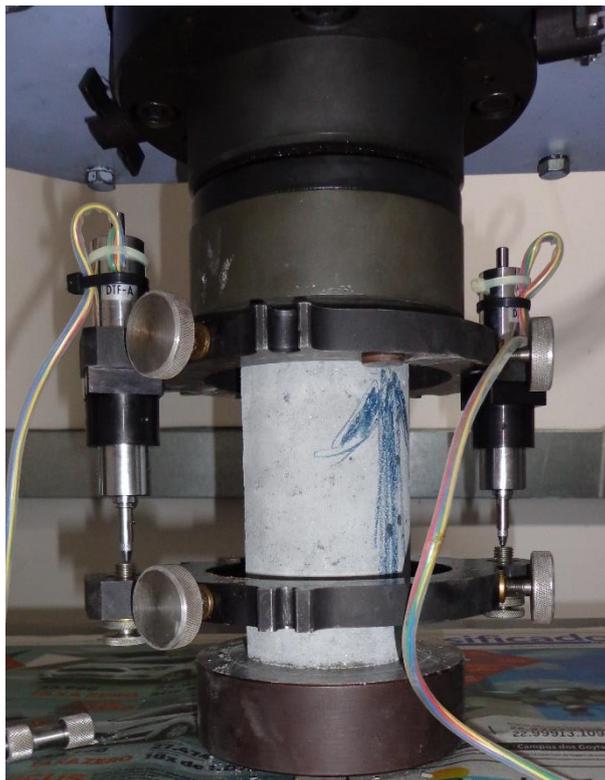


Figura 21: Corpo de prova feito com o concreto da estaca geotérmica sendo ensaiado à compressão.

Tabela 4: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova do concreto da estaca geotérmica.

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade* (GPa)
1	32,0	17,9
2	33,1	18,2
3	26,2	19,1
4	27,0	16,8
Média	29,6	18,0

* Módulo de elasticidade cordal considerando um deslocamento de 50×10^{-6} (e a tensão correspondente a essa deformação) e uma tensão igual a 40% da tensão máxima (e a deformação correspondente a essa tensão).

Além da resistência à compressão, foi obtida a resistência à tração do concreto, através do ensaio de compressão diametral. As dimensões do molde dos corpos de prova e a máquina onde o ensaio foi realizado foram os mesmos utilizados para o ensaio de resistência à compressão. O resultado obtido para cada corpo de prova e a média estão apresentados na Tabela 5. Como se pode ver, a resistência à tração média do concreto foi de 3,4 MPa.

Tabela 5: Resistência à tração indireta do concreto.

Corpo de Prova	Resistência à tração indireta (MPa)
1	3,7
2	3,4
3	3,2
4	3,2
Média	3,4

Para a armação da estaca foram utilizadas 3 barras longitudinais de 9,5 mm de diâmetro e estribos espaçados a cada 20 cm transversalmente. Para o sistema trocador de calor, foi inserida a tubulação responsável por permitir as trocas térmicas. A tubulação foi um tubo PEX-A monocamada de 25 mm de diâmetro externo e 2,3 mm de espessura. A empresa fornecedora do produto foi a MATECON – Sistemas Hidráulicos. Segundo a mesma, esse tubo é fabricado de acordo com a norma UNE-EM ISO 15875, comum a todos os países europeus e de forma a possuir resistência a altas pressões e temperaturas, o que aumenta sua durabilidade. A Figura 22 mostra o tubo PEX já preso à armadura da estaca e a Figura 23 mostra o detalhe da conexão entre a tubulação de entrada e de saída da estaca, que foi feita com dois joelhos de 90°.



Figura 22: Tubo PEX trocador de calor preso à armadura da estaca.



Figura 23: Detalhe da conexão entre as tubulações de entrada e de saída.

Como é possível ver, a tubulação trocadora de calor foi fixada junto à armadura com o auxílio de abraçadeiras.

Além disso, para que se pudesse medir as deformações e a temperatura em alguns pontos da estaca (tanto na armadura, como no concreto), foram instalados extensômetros com medidores de temperatura. Os extensômetros utilizados foram os da marca Geokon sendo que os instalados na armadura foram do Modelo 4150 e os instalados no concreto foram do Modelo 4200, ambos baseados no princípio da corda vibrante. A medição de deformações nos extensômetros de corda vibrante é feita através da auscultação do período de vibração de um fio de aço, que é a corda vibrante, que é preso entre dois pontos ligados à base de medida. Assim, a auscultação é feita por um eletroímã.

Nas Figuras 24 e 25 é possível ver o modelo de extensômetro que foi colocado para medir a deformação no concreto e como foi feita sua instalação na armadura da estaca.



Figura 24: Modo de instalação do extensômetro do concreto.



Figura 25: Extensômetro do concreto.

Já a instalação dos extensômetros na armadura foi feita de forma diferente. Para isto, foi confeccionada, pela equipe da Centrífuga Geotécnica da UENF, uma solda especial para que se pudesse prender o extensômetro junto à armadura sem danificá-lo. A Figura 26 mostra a instalação do extensômetro e a Figura 27 mostra como o extensômetro ficou ao fim de sua instalação.



Figura 26: Instalação do extensômetro da armadura.



Figura 27: Aparência final do extensômetro da armadura após instalação.

A Figura 28 mostra a disposição de todos os extensômetros instalados na estaca. Foram instalados 9 no concreto e 6 na armadura da estaca, sendo que, dos extensômetros instalados no concreto e na armadura, treze estão dispostos verticalmente e dois (centrais) estão dispostos horizontalmente.

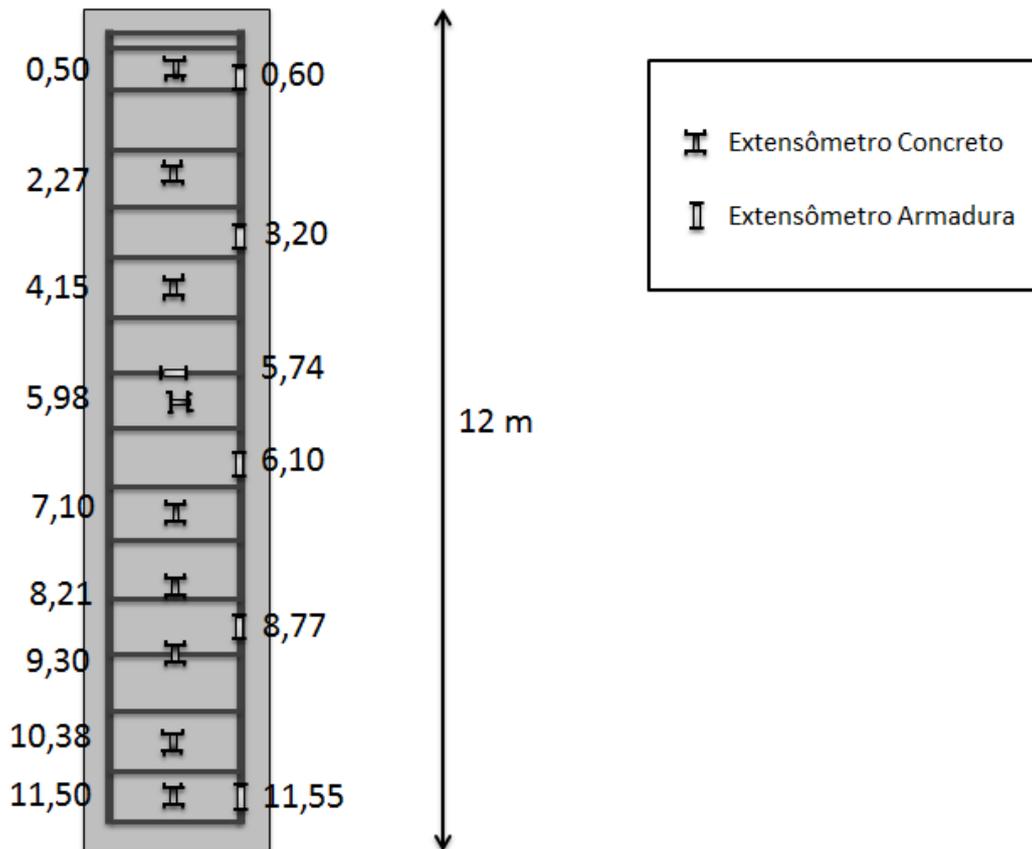


Figura 28: Disposição dos extensômetros e termopares ao longo do comprimento da estaca.

Foi verificada, antes e depois da concretagem, o funcionamento de cada um dos extensômetros e, após a concretagem, foi verificado que o extensômetro mais superior instalado na armadura, na profundidade de 0,60 m, não estava funcionando, o que impossibilitou a medição de deformação na armadura localizada na cabeça da estaca. Acredita-se que o dano tenha ocorrido durante o processo de concretagem.

Após a montagem da armadura, com a colocação da tubulação trocadora de calor, dos extensômetros e termopares, prosseguiu-se com a execução da estaca geotérmica. A Figura 29 mostra a armadura já preparada para ser inserida no furo e a Figura 30 mostra o início da execução da estaca.

Como há a presença de lençol freático no subsolo, optou-se pelo método de execução do tipo Raiz já que ele é feito com revestimento, e, dessa maneira, a estaca foi moldada *in loco*. Nesse método executivo de estaca, normalmente é

utilizada argamassa como material de preenchimento; porém, nesse caso, foi utilizado concreto. Como a concretagem desse tipo de estaca é feito sem vibração, foi utilizado um concreto autoadensável e com baixo teor de brita para inibir o aparecimento de grandes vazios no fuste.



Figura 29: Armadura, tubulação trocadora de calor e sensores prontos para serem inseridos na estaca.



Figura 30: Execução da estaca geotérmica.

Após a execução da estaca, o restante do sistema de troca térmica foi montado. As tubulações de entrada e de saída da estaca foram ligadas a um tanque, onde a água foi aquecida por uma resistência de imersão. O tanque utilizado possui diâmetro de 1,20 m e altura de 50 cm e foi colocada água até o nível de 22 cm no ensaio 1 e nível 18 cm no ensaio 2, que foi suficiente para imergir totalmente a resistência, totalizando um volume de 249 e 203 litros, para os ensaios 1 e 2, respectivamente. Na tubulação de entrada da estaca e saída do tanque, foi instalado um medidor de vazão digital a fim de medir o fluxo e garantir que ele estivesse em regime turbulento, como é prescrito pela norma europeia e pela literatura. O medidor de vazão utilizado foi o FP 2000 SERIES digital, fabricado pela empresa Ômega e está apresentado na Figura 30. E para permitir o fluxo de água no interior da tubulação trocadora, foi utilizada uma bomba centrífuga de $\frac{1}{4}$ CV de potência, Modelo CP-4R e fabricada pela DANCOR S. A. Esses equipamentos estão apresentados na Figura 32.



Figura 31: Medidor de Vazão FP 2000 SERIES digital, Ômega.



Figura 32: Equipamentos instalados para a realização do T.R.T.

Para fornecer o aquecimento ao fluido, foi instalada, no interior do tanque, uma resistência de imersão. A resistência utilizada no ensaio 1 possuiu a potência de 1,2 kW. Ao fim do ensaio 1, no entanto, ela apresentou problemas e foi substituída por uma outra resistência similar porém com potência de 1,3 kW para a realização do segundo T.R.T. As Figuras 33 e 34 mostram a montagem que foi feita na resistência para que fosse possível instalar a resistência no fundo do tanque sem comprometer a sua parte elétrica, que não pode ser molhada. Além disso, a Figura 35 mostra a resistência já instalada no tanque.

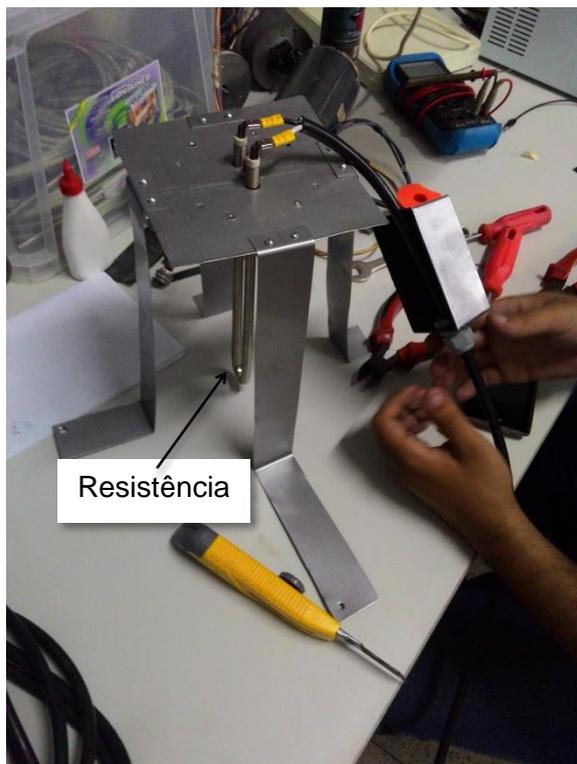


Figura 33: Resistência sendo preparada antes de sua instalação no tanque.



Figura 34: Aparato pronto para ser instalado no tanque.



Figura 35: Resistência de imersão instalada no interior do tanque.

Além disso, a tubulação que fica exposta ao ambiente, ou seja, a que se encontra entre o tanque e a estaca, foi envolta por polietileno expandido de baixa densidade para fornecer isolamento térmica à tubulação trocadora de calor e carga constante ao ensaio.

A Figura 36 mostra o conjunto dos equipamentos montados para a realização do Teste de Resposta Térmica.



Figura 36: Equipamentos instalados para a realização do Teste de Resposta Térmica.

Na Figura 36 também é possível ver o quadro de medições utilizado para aferir as deformações e temperaturas dos sensores que foram instalados no interior da estaca. A Figura 37 apresenta o quadro com mais detalhe. O aparelho utilizado para medir os extensômetros e termopares da estaca foi um leitor de fios vibratórios, Modelo GK-404, que está apresentado na Figura 38.



Figura 37: Quadro de medição dos extensômetros e termopares.



Figura 38: Leitor dos extensômetros e termopares da estaca. (Geokon)

Como é imprescindível ao Teste de Resposta Térmica saber a temperatura de entrada e saída do fluido na estaca, foi instalado um termistor na tubulação logo antes de sua entrada na estaca e outro termistor na tubulação logo após a saída da mesma.

Dessa forma, os termistores utilizados foram os *Pipe-Plug Thermistors Probes*, modelo TH-44004 Series, fabricados pela OMEGA. Eles foram instalados a partir de uma conexão em T na tubulação trocadora de calor em uma angulação de 90° com a tubulação trocadora. A Figura 39 mostra o termistor utilizado e a Figura 40 mostra os dois termistores instalados na tubulação trocadora de calor.



Figura 39: Termistor TH-44004 Series, Ômega.

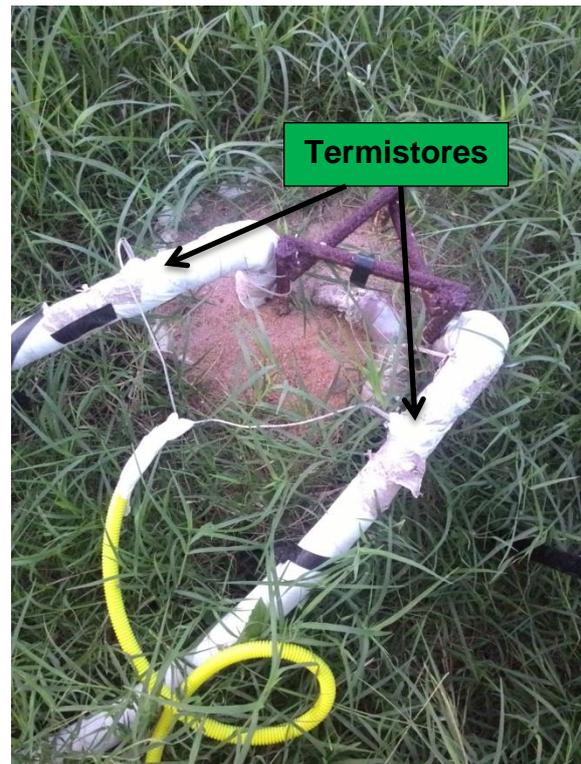


Figura 40: Termistores instalados na tubulação trocadora de calor.

Como as medições de temperatura de entrada e de saída devem ser feitas periodicamente e em um intervalo de tempo curto, foi necessário um sistema de aquisição de dados para realizar as medições e optou-se por utilizar o Arduino.

O Arduino é uma plataforma eletrônica de prototipagem com hardware livre que permite a automatização de tarefas de acordo com a programação compilada na placa. A placa possui entradas e saídas analógicas e digitais, bem como uma entrada USB por onde o programa é compilado. A linguagem utilizada no Arduino é baseada em C/C++ e a escolha pelo Arduino se deu pelo seu baixo preço comparado aos outros sistemas de aquisição de dados. Para se chegar ao objetivo proposto, que era a aquisição dos dados, foram instalados diversos módulos na placa do Arduino Mega 2560, como o módulo SD Card, que recebe todos os dados registrados para um cartão de memória, o módulo RTC DS 1307, que fornece a hora e a data, que permitiram o recebimento e o registro de todos os dados no decorrer do ensaio. No sensor RTC foi colocado o sensor DS18B20 para medir a temperatura na placa do Arduino, temperatura esta que

sofre influência da temperatura ambiente. Além disso, a alimentação de energia na placa do Arduino se deu através de uma fonte bivolt chaveada de 9 volts e 1ª de saída. Pelo fato do Arduino ser sensível à incidência de raios solares, chuva e calor excessivo, ele foi envolto por uma caixa com uma placa de isopor sobre ela, além de ter sido montada uma tenda sobre todo o sistema. A Figura 41 mostra a placa do Arduino ligada aos termistores e com todos os seus módulos e componentes, e a Figura 42 mostra o Arduino protegido durante um ensaio. Na Figura 42 também é possível ver a ligação entre o Arduino e os termistores da estaca, bem como a cabeça da estaca geotérmica.

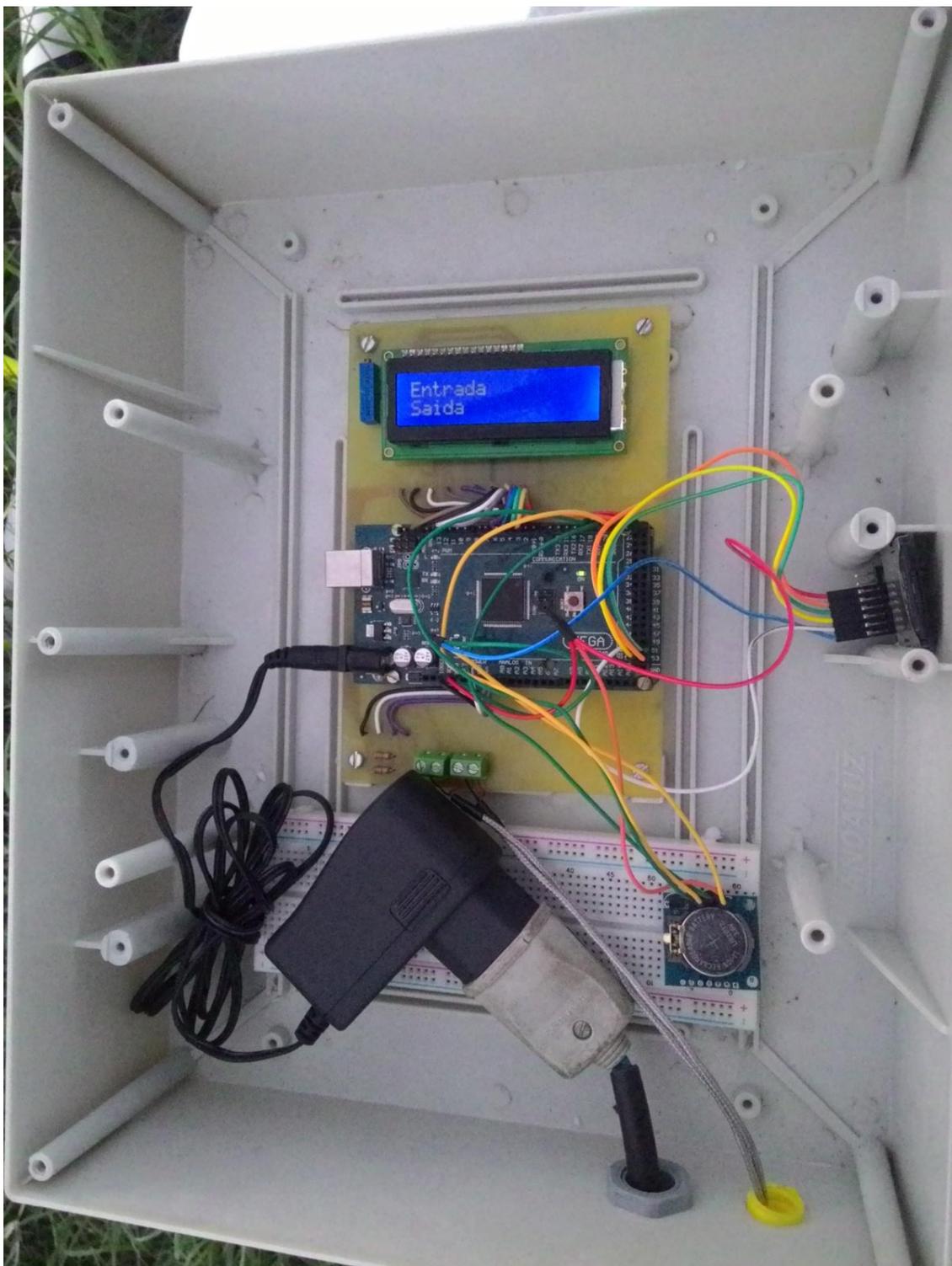


Figura 41: Arduino e seus componentes.

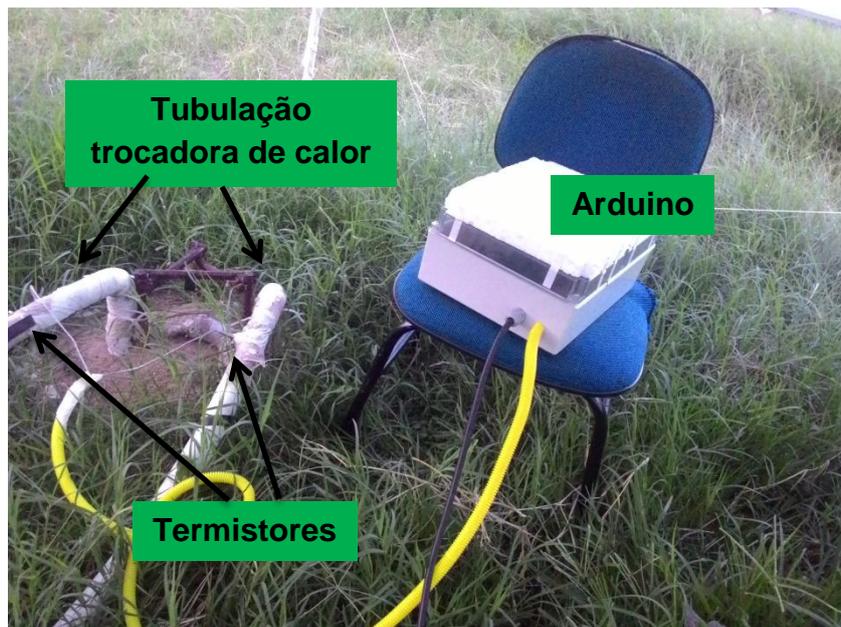


Figura 42: Arduino com sua caixa de proteção e outros componentes do T.R.T.

Na programação do Arduino, a aquisição de dados foi feita para ocorrer a cada 2 minutos, o que forneceu uma quantidade de dados robusta.

Assim como a tubulação trocadora de calor que estava externa ao ambiente, o tanque também foi protegido para minimizar trocas térmicas entre o fluido no interior do mesmo e o ambiente; para isto foram utilizadas placas de isopor, como é mostrado na Figura 43. Nela também é possível ver os cabos de energia que foram ligados no interior da Centrífuga Geotécnica para a realização do ensaio.



Figura 43: Tanque protegido por isopor e fiações ligadas no interior da Centrífuga.

A escolha da vazão adequada ao ensaio levou em conta o cálculo dado pelo manual do próprio medidor de vazão e a consideração da necessidade de trabalhar com o fluido em regime turbulento para que as trocas térmicas fossem eficazes. Dessa forma, o manual fornece o cálculo apresentado na Equação 11 para que se calcule a vazão a partir da qual o fluido estará em regime turbulento.

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{3160 \cdot Q \cdot G}{D \cdot V} \quad (11)$$

sendo Q a vazão em galões por minuto (GPM), G a densidade relativa do fluido, D o diâmetro interno do tubo em polegada (in) e V a viscosidade dinâmica do fluido em centipoise (cP). Além disso, no mesmo manual consta que para um número de Reynolds maior ou igual a 4000, o fluxo estará em regime turbulento. Como o fluido utilizado será água, sua densidade relativa é de 1 e sua viscosidade dinâmica é de 0,891 cP; além disso, o diâmetro interno da tubulação trocadora de calor é de 0,89 polegadas. Com isso, foi possível calcular a vazão, como se segue:

$$\frac{3160 \cdot Q \cdot 1}{0,89 \cdot 0,891} \geq 4000$$

Efetuando a conta, conclui-se que com uma vazão maior ou igual a 1,01 GPM, ou 3,82 l/min o fluxo estará em regime turbulento para esse caso.

Foram realizados dois Testes de Resposta Térmica para duas vazões e cargas térmicas distintas. No primeiro ensaio a vazão escolhida foi de 19,4 l/min e essa escolha foi feita levando em conta a vazão ótima encontrada em duas publicações distintas: You *et al.* (2014), que obteve a vazão ótima variando entre 0,5 e 0,6 m/s e Bandeira Neto (2015) que encontrou uma vazão ótima de 19,4 l/min (0,61 m/s). Já no segundo ensaio, optou-se por variar a vazão a fim de avaliar o efeito desta mudança. Nesse caso, foi utilizada uma vazão de 23,4 l/min. Com relação à carga térmica, como já foi citado anteriormente, utilizou-se uma resistência de imersão de 1,2 kW no primeiro ensaio e outra resistência com potência de 1,3 kW no segundo ensaio.

3.2 Realização do Ensaio

Após a montagem de todo o aparato necessário ao ensaio, iniciou-se com a obtenção da temperatura média não perturbada do solo. Para isso, a bomba de circulação foi ligada e o registro foi aberto e movimentado para que o fluxo fornecido ao sistema estivesse em regime turbulento, com auxílio do medidor de vazão. O Arduino também foi ligado para coletar os dados de temperatura. Então, foi permitido o fluxo de água sem aquecimento por 30 minutos.

Enquanto a medição da temperatura média do solo não perturbado era feita, os extensômetros e termopares instalados no interior da estaca foram medidos. Assim, foi possível obter a medida de deformação e temperatura quando a estaca ainda não era submetida ao aquecimento. Dessa forma, foi possível comparar esses valores iniciais com os obtidos com o aquecimento da estaca.

Decorrido esse tempo, a resistência foi ligada para iniciar o aquecimento do fluido. O primeiro ensaio durou 140 horas e o segundo ensaio durou 115 horas.

No decorrer do ensaio também foi medida periodicamente a temperatura ambiente para que se pudesse avaliar a possível influência na carga térmica depositada no ensaio, a temperatura do fluido no tanque de aquecimento, as condições ambientais e a vazão, para que caso ela se modificasse durante o ensaio, pudesse ser reajustada para o valor adotado. As temperaturas ambiente e do fluido foram medidas através de um termopar com auxílio de um leitor manual que está apresentado na Figura 44.



Figura 44: Leitor utilizado para mostrar as temperaturas ambiente e do fluido medidas pelo termopar.

Periodicamente também foram feitas leituras dos extensômetros e termopares da estaca a fim de medir as deformações graduais que foram ocorrendo com o aquecimento da estaca geotérmica.

Ao fim de cada dia de ensaio, o cartão de memória foi retirado do módulo SD Card do Arduino para que se obtivessem os dados do Teste de Resposta Térmica e até que se chegasse ao fim do ensaio.

3.3 Análise dos dados obtidos com o ensaio - T. R. T

Após a realização do ensaio, iniciou-se a fase de análise dos dados. Inicialmente foi obtida a Temperatura Média Não Perturbada do Solo através da média aritmética dos valores encontrados como temperatura de entrada e de saída no início do ensaio quando a água circulou por 30 minutos sem o aquecimento do fluido.

Posteriormente, com os dados iniciais obtidos, que são as temperaturas de entrada e de saída do fluido na estaca ao longo do tempo, juntamente dos dados de temperatura do sensor DS18B20 que foi instalado na placa do Arduino, foram geradas curvas no Excel, para que se prosseguisse com os cálculos das propriedades térmicas do sistema e das análises termomecânicas da estaca.

Inicialmente foi feito o cálculo da carga térmica depositada no ensaio a cada instante a partir da Equação 9.

Como as temperaturas de entrada e saída foram dados obtidos com o ensaio, foi necessário obter apenas o calor específico do fluido e sua vazão em massa. Como o fluido utilizado foi água, seu calor específico é de 4186,8 J/kg.K e a vazão em massa foi calculada através da equação:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (12)$$

sendo m a massa do fluido e t o tempo. A massa do fluido, por sua vez, é dada por:

$$m = \rho \cdot V \quad (13)$$

sendo ρ a massa específica do fluido e V o volume do fluido. Com essa equação, pode-se reescrever a vazão em massa como:

$$Q_m = \frac{\rho \cdot V}{t} \quad (14)$$

Portanto, como a vazão do fluido é $Q = V/t$, pode-se mais uma vez reescrever a vazão em massa como:

$$Q_m = \rho \cdot Q \quad (15)$$

A massa específica da água é igual a 1000 kg/m³ e então pode-se calcular as vazões em massa para os dois ensaios, visto que a vazão no ensaio 1, Q₁, foi de 19,4 l/min e no ensaio 2, Q₂, foi de 23,4 l/min.

$$Q_{m1} = 1000 \cdot 19,4 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,323 \text{ kg/s}$$

$$Q_{m2} = 1000 \cdot 23,4 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,39 \text{ kg/s}$$

Posteriormente, efetuou-se a subtração da temperatura de saída pela temperatura de entrada em cada instante de tempo e foi possível obter a carga térmica depositada no ensaio em cada momento; e através desses dados foi gerada uma nova curva que relaciona a carga térmica com o tempo. Além disso, pode-se calcular a carga térmica média depositada no ensaio pela média aritmética dos valores encontrados no decorrer do ensaio, descartando anteriormente os dados iniciais onde ocorreu o efeito transiente.

Posteriormente, prosseguiu-se com o cálculo da taxa de troca de calor por metro de estaca em cada instante, através da divisão da carga térmica depositada no ensaio pela profundidade da estaca, que é 12 metros, e a taxa média de troca de calor por metro foi calculada por meio da média aritmética de todos os valores encontrados.

A partir daí foi iniciado o cálculo de um dos parâmetros térmicos mais importantes do ensaio, que é a condutividade térmica, através da Equação 7.

Para isso, inicialmente foi necessário encontrar o k , que é o coeficiente angular da regressão linear da curva obtida ao plotar a temperatura média do fluido (em Kelvin) em função do logaritmo natural do tempo (em segundos), tendo descartados os dados do efeito transiente.

Tendo encontrado o k , e utilizando-se da taxa média de troca de calor por metro, foi possível calcular a condutividade térmica do sistema da estaca geotérmica.

Através da condutividade, posteriormente foi possível calcular a resistência térmica do furo, que é outro relevante fator a se considerar no projeto das estacas geotérmicas. Isso se deu através da Equação 8.

Sendo ΔT a diferença de temperatura entre o fluido naquele instante (dado pela média entre as temperaturas de entrada e de saída da estaca) e a temperatura média do solo não perturbado. Todos os parâmetros necessários para calcular a resistência térmica em cada instante já terão sido fornecidos nesse momento, exceto a difusividade térmica do solo α . A difusividade térmica pode ser calculada através da equação:

$$\alpha = \frac{\lambda}{S_{CV}} \quad (15)$$

sendo que S_{CV} é a capacidade calorífica volumétrica do solo. A estimativa de S_{CV} foi feita em função do perfil estratigráfico do solo e com auxílio da Tabela 3.

Sendo assim, utilizando as informações de perfil estratigráfico, ou seja, de acordo com as camadas do solo local, foi calculada a capacidade calorífica volumétrica pela média ponderada com base nos valores da Tabela 3 para cada tipo de solo, como se segue:

$$\begin{aligned} S_{CV} &= \\ &= \frac{3200 \cdot (3,05 + 0,95 + 3) + 2750 \cdot (0,9 + 3,1 + 4,1 + 5,6) + 3000 \cdot (2,9 + 3,65) +}{30,45} \\ &+ \frac{2875 \cdot 3,2}{30,45} = \frac{2920,36 \cdot 10^3 J}{m^3 K} \end{aligned}$$

A partir disso foi possível calcular a difusividade térmica do solo e consequentemente a resistência térmica do furo em cada instante do ensaio, bem como a média desses valores.

3.4 Análise dos Dados obtidos com o ensaio - Termomecânica

Posteriormente, o efeito que o gradiente térmico gerou no estado de deformações e tensões da estaca foi avaliado. O cálculo das deformações

internas se deu a partir de uma metodologia de cálculo dada pelo Manual de Instruções dos extensômetros utilizados.

Para os extensômetros inseridos no concreto da estaca a metodologia de cálculo foi feita como se segue. Segundo o manual, o método do encurtamento do fio da corda vibrante produz um leve excesso no registro da deformação e esse efeito pode ser removido através da utilização de um coeficiente B, que é fornecido por cada extensômetro. Dessa forma, pode-se calcular a deformação aparente corrigida por:

$$\varepsilon_{corrigida} = B(R_1 - R_0) \quad (16)$$

sendo que R_1 e R_0 são leituras dos extensômetros realizadas em tempos diferentes e B possui um valor típico de 0,96 segundo o manual.

Além disso, o mesmo manual fornece outro cálculo para determinar, de fato, a deformação real ocorrida no concreto. A mesma pode ser calculada por:

$$\varepsilon_{real,c} = B \cdot (R_1 - R_0) + (T_1 - T_0) \cdot C_1 \quad (17)$$

sendo C_1 o coeficiente de expansão do aço, que é o material constituinte do extensômetro e que possui o valor de $12,2 \mu\varepsilon/^\circ\text{C}$. Essa correção é importante, pois mitiga os efeitos que a temperatura proporciona no próprio extensômetro e que influencia na deformação que está sendo medida.

A partir da Equação 17 foram calculadas as deformações ocorridas ao fim de cada dia de ensaio no concreto para que se pudesse ver a evolução das mesmas. A convenção de sinais utilizada foi a de que as tensões e deformações positivas significam compressão.

Já para os extensômetros colocados na armadura, o cálculo da deformação também se deu através da Equação 17, também fornecida pelo manual do extensômetro:

$$\varepsilon_{real,a} = B \cdot (R_1 - R_0) + (T_1 - T_0) \cdot C_1 \quad (18)$$

Sendo que o coeficiente B, nesse caso, vale 0,91 e os outros parâmetros da equação são os mesmos utilizados na Equação 17, mas que foram medidos nos extensômetros colocados na armadura da estaca.

Dessa forma, assim como foi feito para os extensômetros do concreto, foram calculadas as deformações ocorridas ao fim de cada dia de ensaio na armadura. Assim, foi possível ver a evolução das deformações e posteriormente foi gerado um gráfico relacionando a evolução das deformações com a profundidade.

Posteriormente, foi feito um gráfico que relaciona os acréscimos de deformações axiais térmicas no concreto com a correspondente variação de temperatura ocorrida em cada sensor. A partir dessas curvas, pode-se obter os coeficientes médios de expansão térmica mobilizados em cada sensor imerso no concreto. Isso é feito a partir das inclinações das curvas obtidas com esse gráfico.

Tendo calculado os coeficientes de expansão térmica, foram calculadas as tensões nos pontos da estaca onde os sensores do concreto estavam inseridos. Para isso, foi utilizada a Equação 19:

$$\sigma_T = E(\varepsilon_T - \alpha_{irrestrito} \cdot \Delta T) \quad (19)$$

sendo E o módulo de elasticidade do concreto armado, que é 30 GPa, obtido de Murphy e McCartney (2014) e ε_T a deformação térmica em um dado sensor. O produto $\alpha_{irrestrito} \cdot \Delta T$ resulta na deformação térmica da estaca para condições não restringidas, ou seja, a tensão gerada na estaca leva em conta a deformação que é restrita na estaca, sendo $\alpha_{irrestrito}$ o coeficiente de expansão térmica do concreto da estaca, que estimado para concretos fluidos em $16 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Após o cálculo de tensão para cada sensor, foi plotado um gráfico relacionando a tensão com a profundidade.

Posteriormente, foi calculado o atrito lateral mobilizado para cada intervalo de sensores através da equação:

$$f_{s,mob,j} = \frac{(\sigma_{T,j} - \sigma_{T,j-1})D}{4\Delta l} \quad (20)$$

sendo D o diâmetro da estaca, Δl a diferença de profundidade entre o sensor j e j-1 e $\sigma_{T,j} - \sigma_{T,j-1}$ a diferença de tensão térmica entre o sensor j e j-1. Assim, pode-se calcular o atrito lateral mobilizado médio de cada camada de sensor e foi possível gerar a curva que relaciona o atrito lateral com a profundidade.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para a análise da presente pesquisa, foram realizados dois Testes de Resposta Térmica e posteriormente foi feita a avaliação termomecânica da estaca ao ser submetida ao gradiente térmico dos dois ensaios e esses resultados estão apresentados adiante.

4.1 Teste de Resposta Térmica

4.1.1 Ensaio 1

O ensaio 1 teve a duração de 140 horas e ocorreu com a resistência elétrica de 1,2 kW de potência, a uma vazão de 19,4 l/min.

Inicialmente foi obtida a Temperatura média do solo não perturbado. A Tabela 6 apresenta os valores encontrados no decorrer desse processo e a média aritmética de todos os valores.

Tabela 6: Temperatura média do solo não perturbado (Ensaio 1).

Tempo (min)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)
1,68	28,37	29,06
3,68	28,65	28,60
5,68	28,58	28,69
7,68	28,85	28,54
9,68	28,58	28,76
11,67	28,65	28,76
13,67	28,64	28,71
15,67	28,68	28,65
17,67	28,72	28,39
19,66	28,75	29,00
21,66	28,78	28,89
23,66	28,74	28,69
25,66	28,71	28,83
27,66	28,39	28,64
29,65	28,80	28,71
31,65	28,70	28,68
33,65	28,62	28,93
35,65	28,66	28,89
37,64	28,77	29,09
39,64	28,69	28,76
Média local	28,67	28,76
Média global	28,72	

Através da Tabela 6 é possível observar que a temperatura média do solo foi de $28,72^{\circ}\text{C}$, ou seja, aproximadamente 29°C .

Com a aquisição dos dados, foi possível obter as curvas de temperaturas de entrada e de saída do fluido, bem como a temperatura do sensor instalado na placa do Arduino, no decorrer do ensaio. Esses dados estão apresentados na Figura 45.

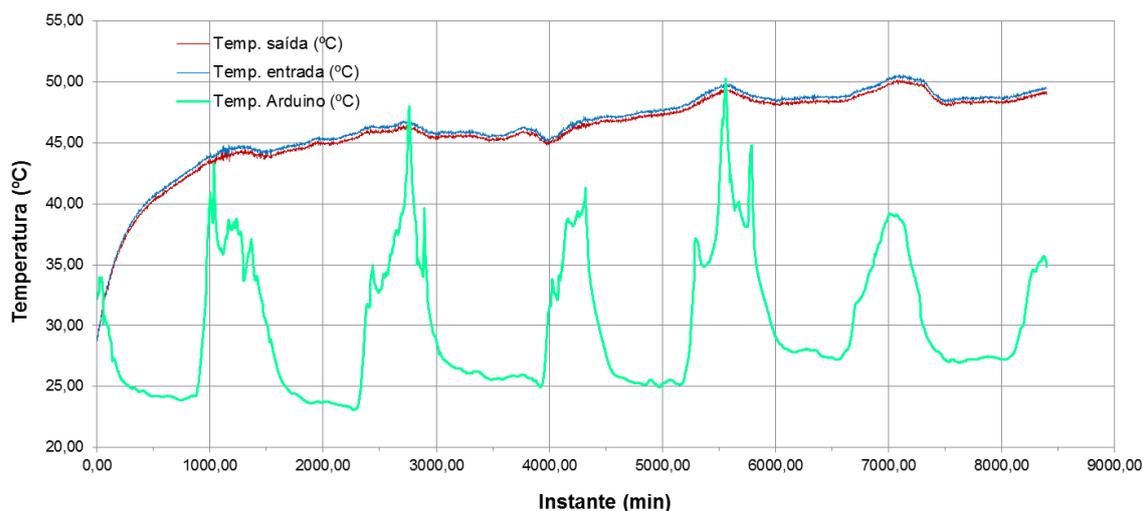


Figura 45: Temperaturas obtidas com o Teste de Resposta Térmica no Ensaio 1.

O período transiente pode ser observado na Figura 45 no início do ensaio, em que é possível ver o aumento expressivo que ocorre inicialmente nas temperaturas de entrada e saída e posteriormente a relativa estabilização das mesmas.

Também é possível observar, pela análise da Figura 45, que houve uma influência da temperatura ambiente nas temperaturas de entrada e saída da estaca, mesmo com a isolamento térmica dos elementos do ensaio. Isso é identificado pelos picos de temperatura de entrada e saída que acompanham os picos de temperatura da placa de Arduino, que estava sendo submetida à temperatura ambiente.

De posse das temperaturas de entrada e de saída, foi calculada a carga térmica depositada no ensaio em cada instante do mesmo pela Equação 9, e o resultado é apresentado na Figura 46.

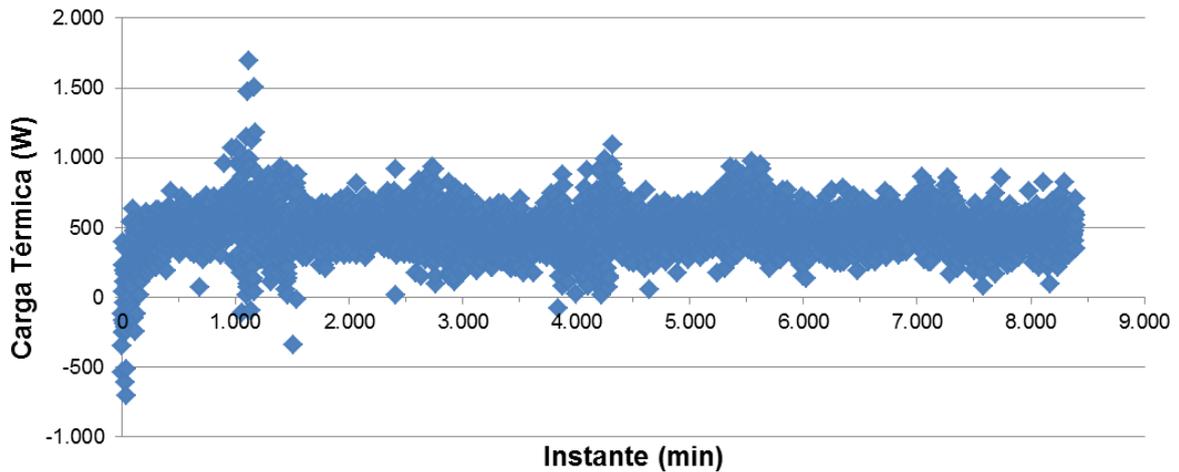


Figura 46: Carga Térmica depositada no Ensaio 1.

Sendo assim, foi calculada a carga térmica média depositada no ensaio e foi obtido o valor de 484,02 W. Posteriormente foi calculada a taxa de calor média por metro de estaca pela Equação 10 e foi obtido o valor de 40,33 W/m para o T.R.T 1.

Após a realização destes cálculos, foi gerada a curva que relaciona o logaritmo natural do tempo (em segundos) com a temperatura média do fluido. Há de se observar que foi feito o descarte do tempo transiente inicial do ensaio, como é recomendado pela literatura.

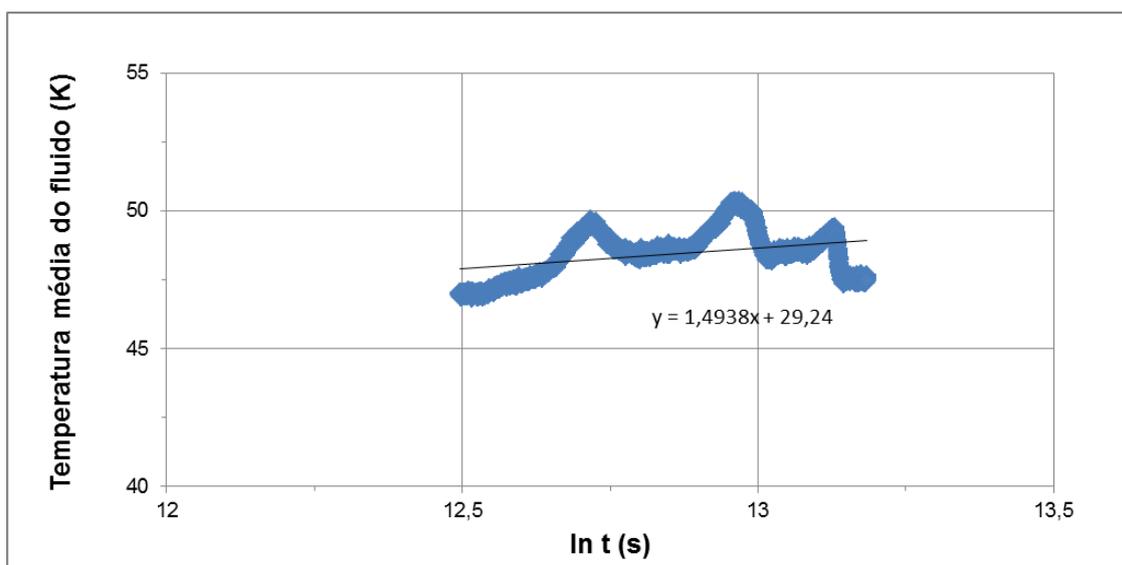


Figura 47: Regressão linear do Logaritmo natural do tempo versus Temperatura média do fluido para o Ensaio 1.

Como é possível observar com a Figura 47, o coeficiente angular da reta obtida com a regressão linear dos dados foi de 1,4938, e esse é o valor de k utilizado no cálculo da condutividade térmica.

Sendo assim, pôde-se calcular a condutividade térmica do sistema através da Equação 7 e foi obtida uma condutividade térmica de 2,15 W/m.K para o sistema no decorrer do Ensaio 1.

Segundo a norma europeia (CEN/TC 341 N525 2011), solos com condutividades térmicas maiores que 1,7 W/m.K são considerados de alta condutividade térmica. Dessa forma, a condutividade térmica obtida com o sistema é considerada satisfatória para seu devido fim.

Tendo calculado a condutividade térmica, parte-se para o cálculo da resistência térmica do sistema com o auxílio da Equação 8. Antes disso, foi necessário calcular a difusividade térmica α através da Equação 15 e foi obtido o valor de $7,40 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Então, como resultado da resistência térmica foi obtido o apresentado na Figura 48.

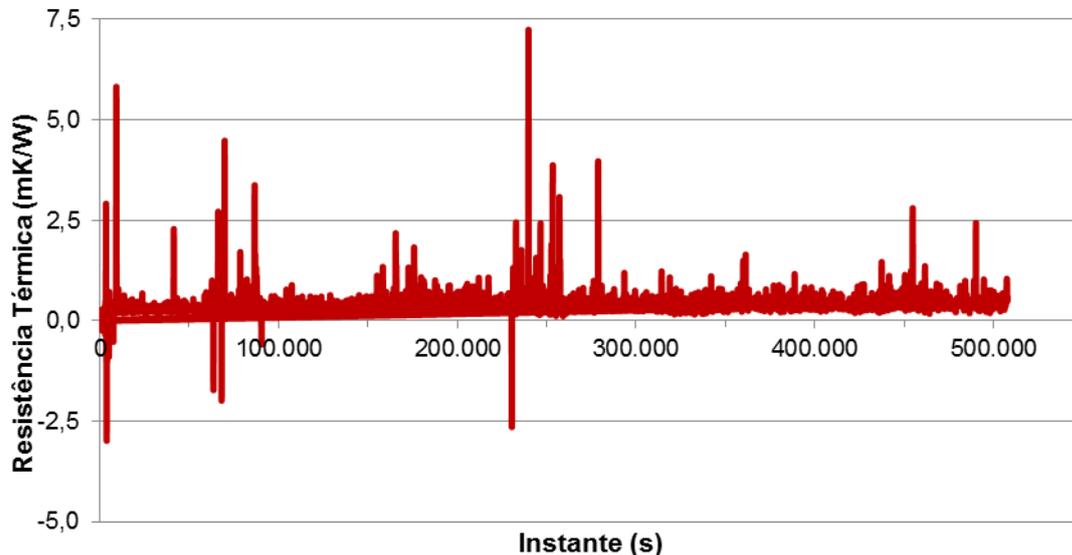


Figura 48: Resistência Térmica ao longo do Ensaio 1.

Dessa forma, foi encontrado um valor médio de 0,43 mK/W para a resistência térmica no Ensaio 1.

4.1.2 Ensaio 2

O ensaio 2 teve a duração de 115 horas e ocorreu com a resistência elétrica de 1,3 kW de potência, a uma vazão de 23,4 l/min.

Inicialmente foi obtida a Temperatura média do solo não perturbado mais uma vez. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados no decorrer desse processo e a média aritmética de todos os valores.

Tabela 7: Temperatura média do solo não perturbado (Ensaio 2).

Tempo (min)	Temp, entrada (°C)	Temp, saída (°C)
1,68	30,06	30,02
3,68	29,96	30,08
5,68	29,92	30,02
7,68	29,92	30,24
9,68	29,79	29,94
11,67	30,08	30,07
13,67	30,32	30,11
15,67	30,02	30,02
17,67	29,91	30,03
19,66	29,96	30,19
Média local	29,99	30,07
Média global	30,03	

Através da Tabela 7 é possível ver que a temperatura média do solo foi de 30,03 °C, ou seja, aproximadamente 30 °C para a data do presente ensaio. Ou seja, no T.R.T 2 o solo estava com a sua temperatura média elevada em 1° comparado ao T.R.T 1.

Aqui também foi possível obter as curvas de temperaturas de entrada e de saída do fluido, bem como a temperatura do sensor instalado na placa do Arduino, no decorrer do ensaio 2. Esses dados estão apresentados na Figura 49.

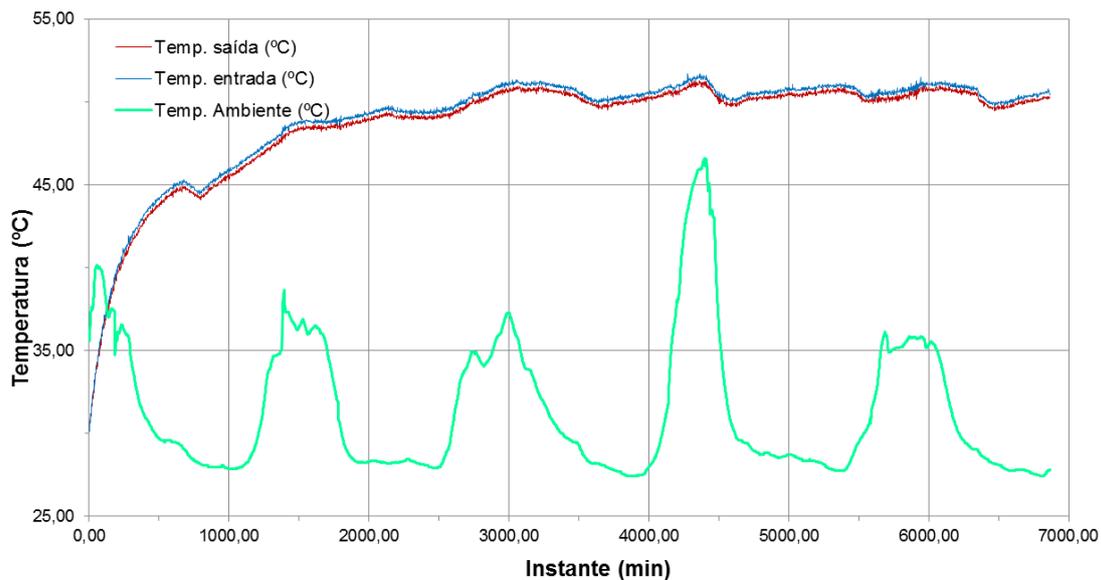


Figura 49: Temperaturas obtidas com o Teste de Resposta Térmica no Ensaio 2.

Aqui também é possível ver as flutuações nas temperaturas de entrada e saída influenciadas pelas variações de temperatura ambiente.

De posse das temperaturas, foi calculada a carga térmica depositada no ensaio em cada instante do mesmo pela Equação 9, e o resultado é apresentado na Figura 50.

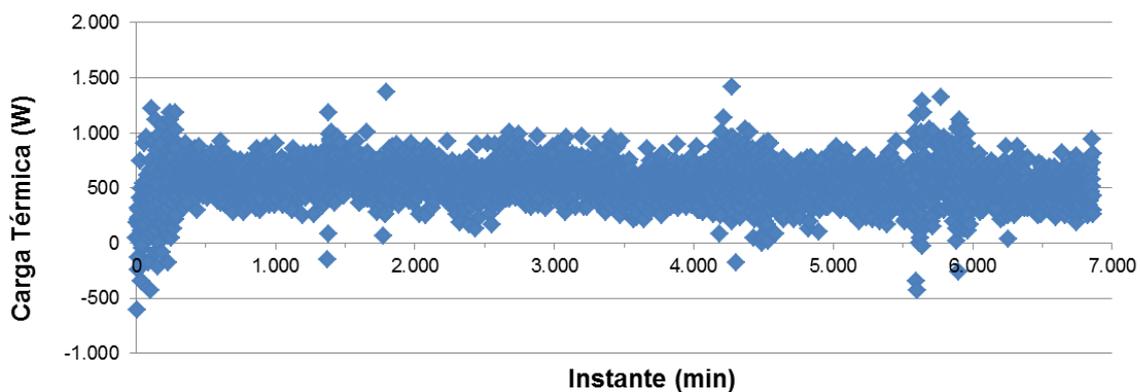


Figura 50: Carga Térmica depositada no Ensaio 2.

Sendo assim, foi possível obter a carga térmica média depositada no ensaio 2, que foi de 551,90 W e posteriormente foi calculada a taxa de calor média por metro de estaca pela Equação 10 e obteve-se o valor de 45,99 W/m.

É interessante notar que os pontos de maiores flutuações de carga térmica no ensaio coincidiram com momentos onde choveu, e as condições ambientais externas podem justificar o comportamento encontrado no gráfico.

Tendo realizado esses cálculos, foi gerada a curva que relaciona o logaritmo natural do tempo (em segundos) com a temperatura média do fluido. Aqui mais uma vez foi feito o descarte do tempo transiente.

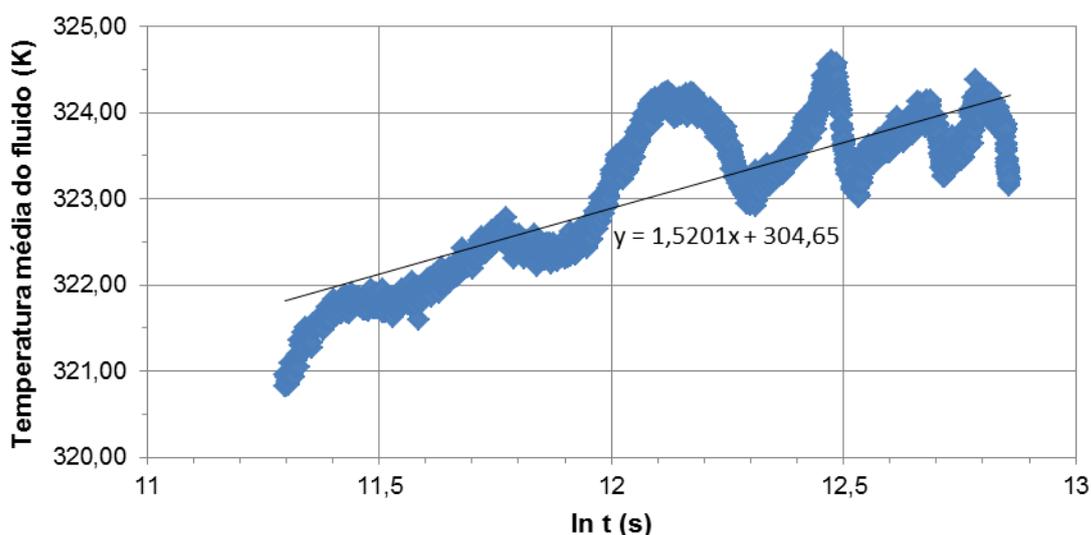


Figura 51: Regressão linear do Logaritmo natural do tempo versus Temperatura média do fluido para o Ensaio 2.

Como é possível observar com a Figura 51, o coeficiente angular da reta obtida com a regressão linear dos dados foi de 1,5201, e esse é o valor de 'k' utilizado no cálculo da condutividade térmica.

Sendo assim, foi calculada a condutividade térmica do sistema através da Equação 7, e foi obtida uma condutividade térmica de 2,41 W/m.K para o sistema no decorrer do Ensaio 2. Dessa forma, foi obtida uma alta condutividade térmica, que inclusive foi superior à encontrada no Ensaio 1. Isso pode ter ocorrido devido a maior potência térmica e vazão aplicadas no segundo ensaio.

Tendo calculado a condutividade térmica, foram feitos os cálculos da resistência térmica do sistema com o auxílio da Equação 8. Antes disso, foi necessário calcular a difusividade térmica α através da Equação 15 e foi obtido

o valor de $8,28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Então, como resultado da resistência térmica foi obtido o apresentado na Figura 52.

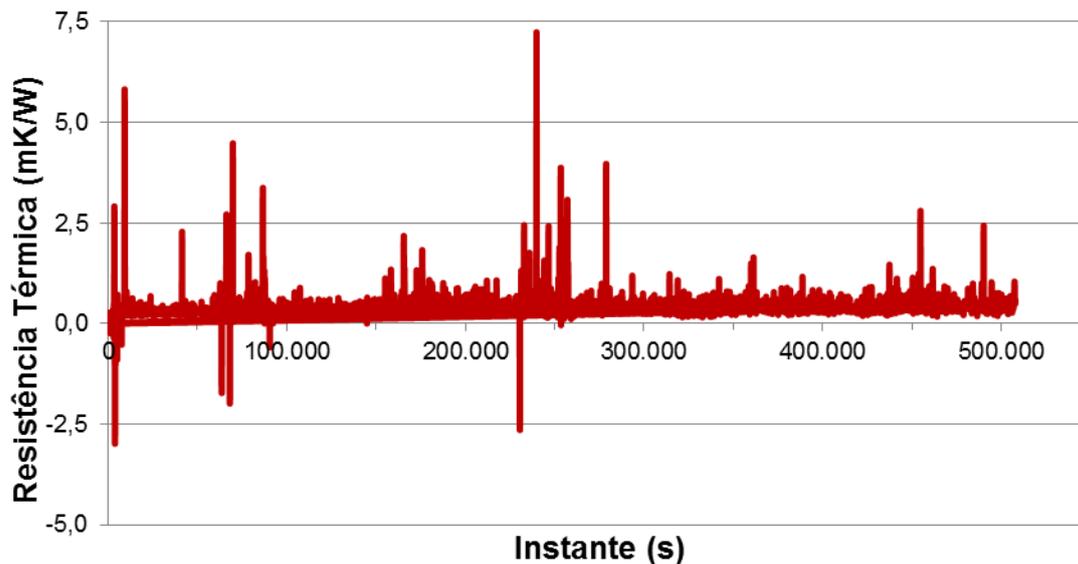


Figura 52: Resistência Térmica ao longo do Ensaio 2.

Dessa forma, foi encontrado um valor médio também de 0,41 mK/W para a resistência térmica no Ensaio 2.

Também foi gerada uma tabela comparativa das propriedades térmicas obtidas com o T.R.T 1 e 2.

Tabela 8: Comparação entre as propriedades térmicas obtidas com os ensaios 1 e 2.

	Potência (kW) e Vazão (l/min)	Carga térmica depositada (W)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Resistência Térmica (m.K/W)
Ensaio 1	1,2 e 19,4	484,02	2,15	0,43
Ensaio 2	1,3 e 23,4	551,90	2,41	0,41

Pela análise da Tabela 8, pôde-se observar que o ensaio 2 forneceu uma condutividade térmica maior que o ensaio 1. Isso pode ser justificado mais uma vez pela carga térmica depositada, que foi maior no ensaio 2 e também pela vazão, que foi maior no ensaio 2 e otimizou as trocas térmicas. Com relação à resistência térmica, o valor obtido foi o mesmo em ambos os ensaios.

4.2 Análise Termomecânica

Após a análise das propriedades térmicas do solo, foi feita a análise termomecânica da estaca submetida ao gradiente térmico.

4.2.1 Ensaio 1

Inicialmente foram traçadas as curvas que relacionam as temperaturas ao longo da profundidade da estaca, ao fim de cada dia de ensaio e passados alguns dias do término do mesmo: um gráfico para os sensores presos à armadura e outro para os sensores imersos no concreto. Essas curvas estão apresentadas nas figuras 53 e 54. Importante ressaltar que o sensor indicado como “6”, é o sensor instalado horizontalmente na estaca.

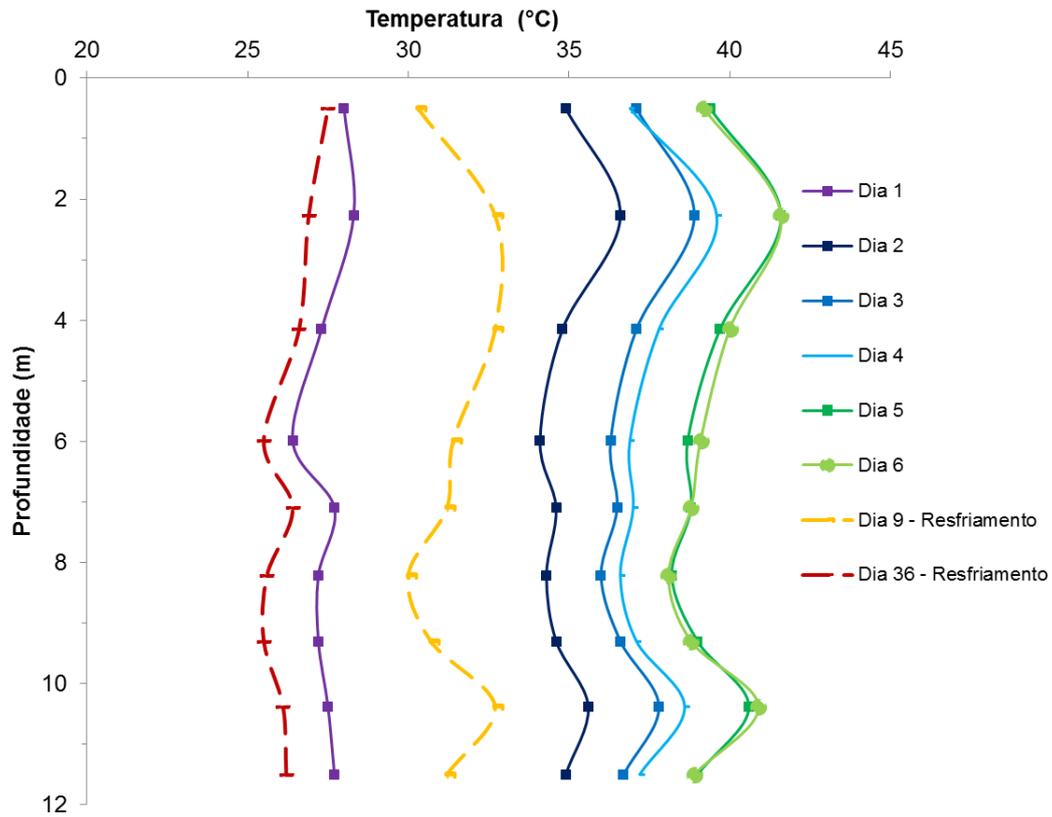


Figura 53: Temperaturas do concreto da estaca em cada dia do Ensaio 1.

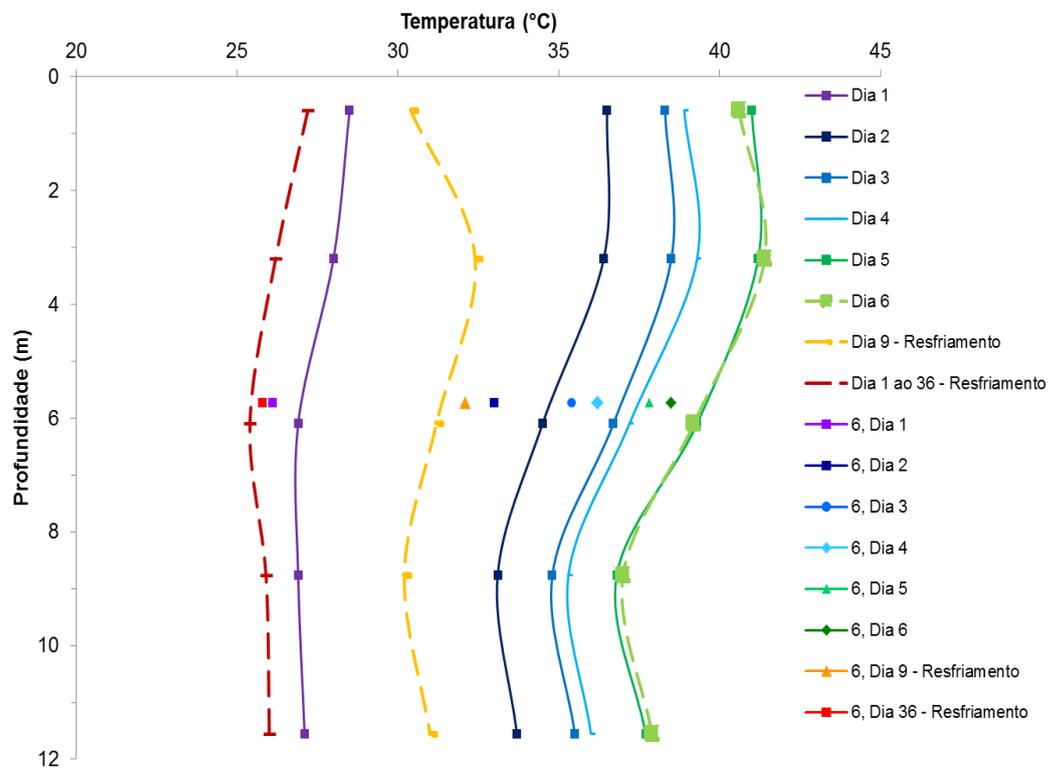


Figura 54: Temperaturas da armadura da estaca em cada dia do Ensaio 1.

Como é possível observar nas figuras 53 e 54, a temperatura vai aumentando com o progresso do ensaio. Nos sensores do concreto, as profundidades de 2,27 e 10,38 metros desenvolveram as maiores temperaturas no decorrer do ensaio e a profundidade de 8,77 metros obteve a menor temperatura. Já nos sensores da armadura, as maiores temperaturas foram observadas na cabeça da estaca, sobretudo na profundidade de 3,20 metros e a menor temperatura foi observada na profundidade de 8,77 m, a mesma do concreto. Pode-se observar que as maiores temperaturas foram encontradas nas camadas de argilosa. Esse comportamento possivelmente ocorre pela baixa difusividade da argila, que fez com que o calor ficasse retido na estaca ao invés de migrar para o solo no entorno.

É possível observar também, que o sensor 6 da armadura, localizado horizontalmente na profundidade de 5,74 metros, sempre registrou uma temperatura inferior à da tendência da curva dos demais sensores, que estão localizados verticalmente. Isso pode ser justificado pelo fato dos sensores verticais estarem em contato direto com a tubulação trocadora de calor, ao contrário do sensor horizontal, que está mais afastado, no eixo central da estaca.

A partir dos dados de deformação medidos, e através da correção proporcionada pela Equação 17, foram calculados os incrementos de deformação térmica ao fim de cada dia de ensaio para os sensores dispostos no concreto da estaca. A deformação tida como inicial é a deformação medida no início do ensaio, antes de ser imposta qualquer carga térmica à estaca. Posteriormente, foram traçadas as curvas de incremento de deformação, ao fim de cada dia de ensaio, ao longo da profundidade da estaca para o Ensaio 1, o que gerou a Figura 55. O sensor 6, disposto horizontalmente, foi plotado separadamente dos demais sensores. Também foram calculadas as deformações do concreto da estaca ocorridas após o término do ensaio, com a retirada da carga térmica, depois de nove dias do início do ensaio, ou seja, três dias após a retirada da carga térmica e após 36 dias do início do ensaio, o que também está apresentado na Figura 55.

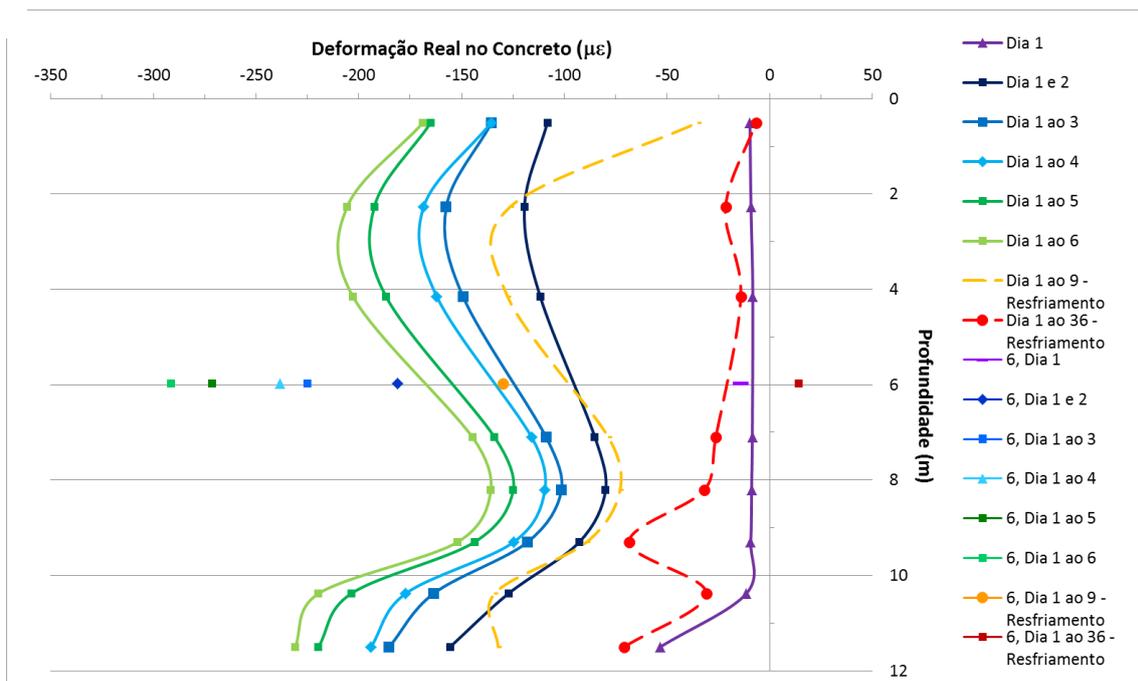


Figura 55: Incrementos de deformação ocorridos no concreto da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 1.

De maneira geral pode-se observar que as deformações foram crescentes com a evolução do ensaio, chegando ao seu máximo no sexto e último dia de aquecimento e que a estaca tendeu a se expandir. A maior deformação foi percebida na ponta da estaca, e que pode ter ocorrido devido ao processo executivo da mesma, que fez com que ocorresse baixa resistência na ponta, permitindo, assim, uma grande deformação nesse local. Grandes deformações também ocorreram na parte superior da estaca, em profundidades de 2,27 m e 4,15 m, possivelmente devido à ausência de restrição na cabeça da estaca. O ponto de menor deformação ocorreu na profundidade de 8,21 metros e nos sensores adjacentes, localizados próximos ao centro da estaca.

Pode-se observar também, pela análise da Figura 55, que com o resfriamento, o sensor instalado na profundidade de 9,30 metros, não se recuperou totalmente da deformação passados os 36 dias após o início do ensaio 1. Possivelmente isso ocorreu pela presença de argila mole nessa profundidade, que pode ter levado um maior tempo para dissipar o calor do ensaio, devido a sua baixa difusividade, o que gerou mais acréscimo de deformação, mesmo na ausência de carga térmica adicionada.

Além disso, o sensor disposto horizontalmente próximo ao centro da estaca sempre apresentou deformações consideravelmente maiores que as deformações dos sensores dispostos verticalmente; isso pode ser atribuído a maior facilidade do concreto se deformar nesta direção, que na direção vertical, devido à menor restrição. Com o resfriamento, após o fim do ensaio, também foi observada uma deformação de compressão no sensor disposto horizontalmente na profundidade de 5,98 metros.

Os incrementos de deformação ocorridos nos sensores colocados na armadura foram calculados com a Equação 18 ao fim de cada dia do ensaio 1, e estão apresentadas na Figura 56.

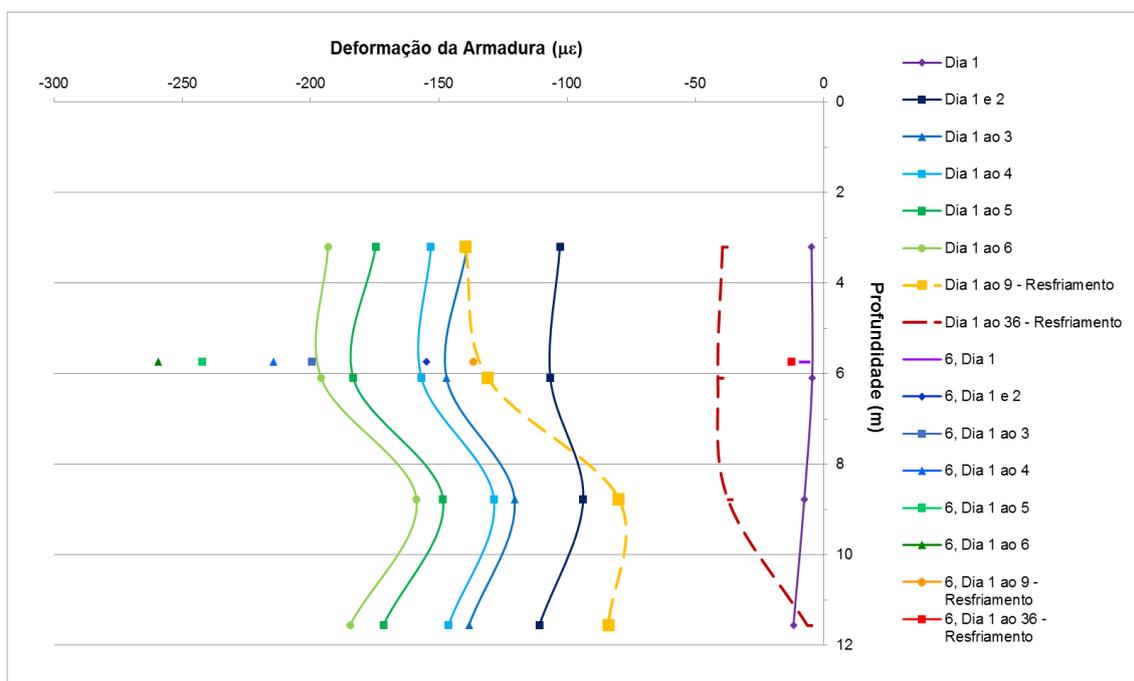


Figura 56: Incrementos de deformação ocorridos na armadura da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 1.

Analisando a Figura 56, pode-se observar que nesse caso também houve um crescimento das deformações térmicas com a evolução do ensaio. As tendências de deformação na armadura foram parecidas com o concreto, tendo maiores deformações nas extremidades da estaca; no entanto, a armadura se deformou mais próximo à cabeça que em sua ponta. Já com relação ao sensor horizontal da armadura, também foram verificadas maiores deformações que

nos sensores dispostos verticalmente, assim como ocorreu para os sensores do concreto.

Posteriormente, os acréscimos de deformações térmicas no concreto foram plotados em função da variação de temperatura. Isso foi feito separadamente para cada sensor, para que se pudesse obter os coeficientes de expansão térmica em cada profundidade em particular. Para isso, foi feita a regressão linear da curva de cada sensor, como é apresentado na Figura 57.

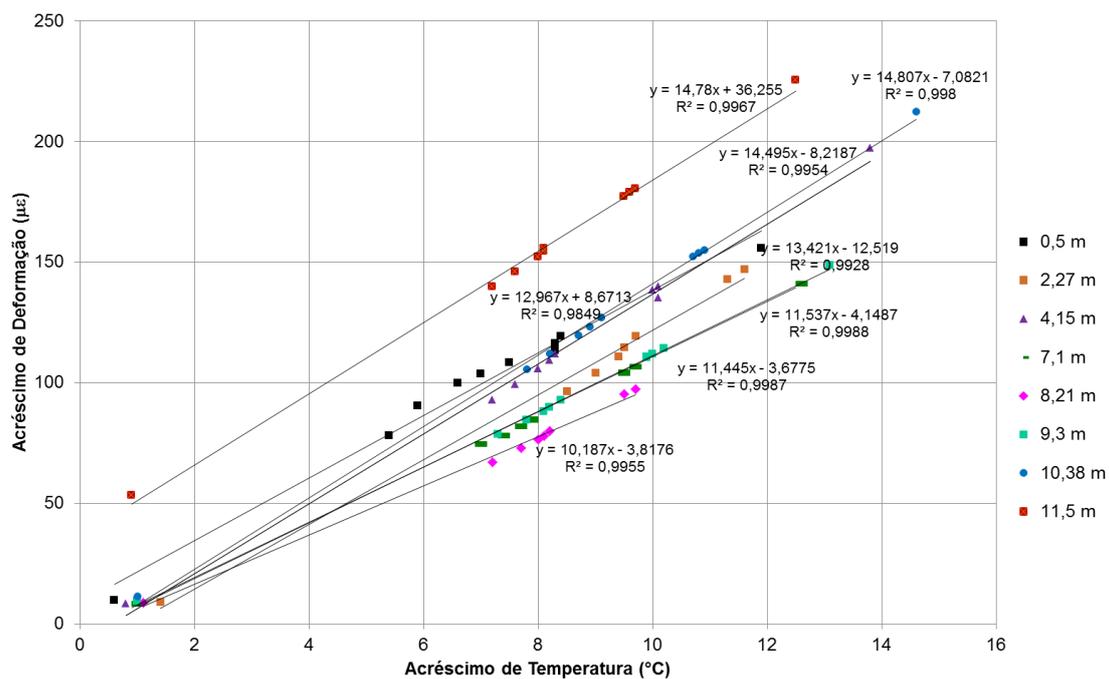


Figura 57: Obtenção dos coeficientes de expansão térmica no Ensaio 1.

Dessa forma, com a regressão feita, foram obtidos os coeficientes de expansão térmica pela inclinação de cada curva e foi possível plotar um gráfico que relaciona os coeficientes de expansão térmica com a profundidade para o Ensaio 1, como é mostrado na Figura 58.

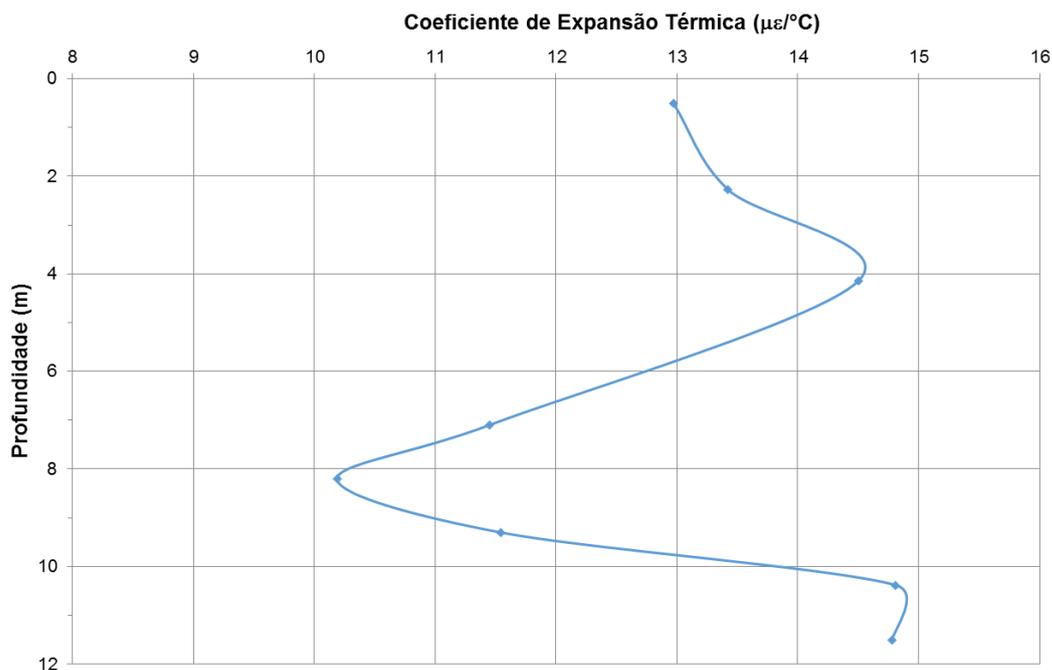


Figura 58: Coeficientes de expansão térmica mobilizados ao longo da profundidade da estaca no Ensaio 1.

Assim como a maior deformação, o maior coeficiente de expansão térmica ocorreu na ponta da estaca, sendo este próximo do coeficiente do concreto da confecção da estaca, o que significa que houve pouquíssima restrição à deformação na região da ponta. Além disso, na profundidade de 4,15 metros também obteve-se um coeficiente de expansão térmica expressivo. A profundidade de menor coeficiente foi a de 8,21 metros, onde também ocorreu o mínimo de deformação térmica.

Posteriormente, foram calculadas as tensões no interior da estaca ao ser submetida ao aquecimento pela Equação 19. As deformações utilizadas para esse cálculo foram as do sexto dia de ensaio, onde a estaca estava submetida à máxima carga térmica, juntamente com seus respectivos ΔT s. Assim, o resultado está apresentado na Figura 59, onde é possível observar as tensões geradas em MPa.

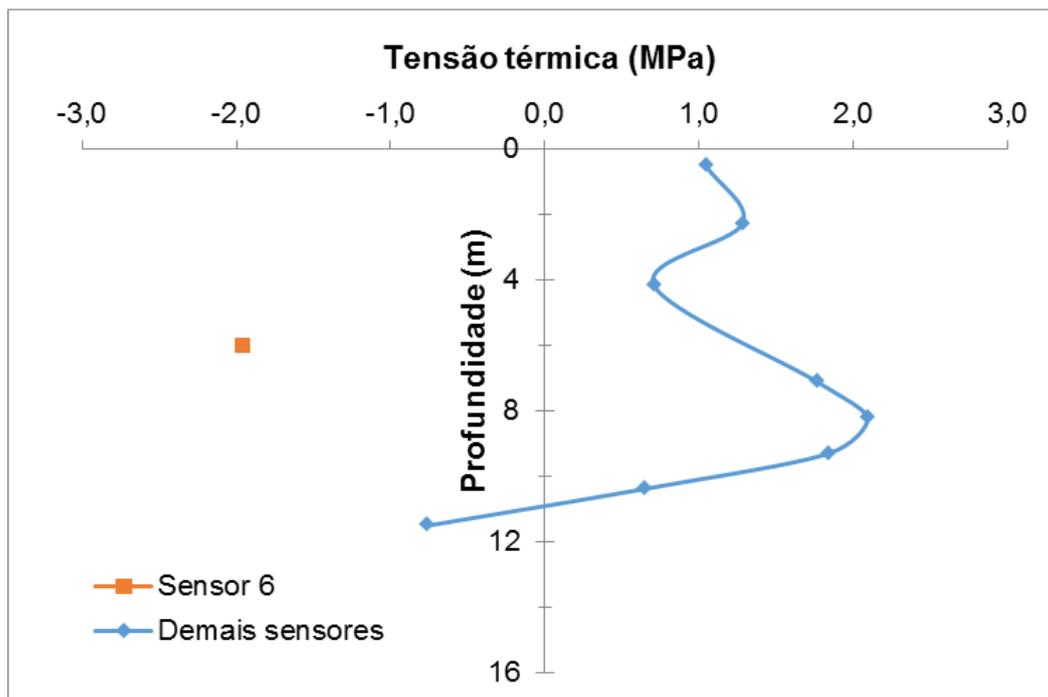


Figura 59: Tensões geradas na estaca com o Ensaio 1.

Pela análise do gráfico, pode-se perceber que a estaca ficou submetida a esforços de compressão em sua maior parte, tendo seu valor máximo na profundidade de maior restrição, e portanto menor deformação, que foi a 8,21 metros de profundidade. Dessa forma, a tensão máxima de compressão a que a estaca foi submetida, foi de 2,09 MPa, que é um valor bem inferior à resistência à compressão do concreto utilizado nessa estaca. No entanto, a ponta da estaca sofreu esforços de tração de 0,76 MPa devido à baixa resistência de ponta e à grande deformação ocorrida nesse local. Também o sensor horizontal ficou submetido a esforços de tração, com magnitudes de 1,96 MPa. Ainda assim, o valor das tensões de tração foram baixos e não devem levar a estaca à ruína, já que foi utilizada armadura para resistir a esses esforços.

Em seguida, de posse das tensões axiais na estaca a partir do Ensaio 1, pôde-se calcular o atrito lateral mobilizado com o aquecimento da estaca, pela Equação 20. O resultado está apresentado na Figura 60.

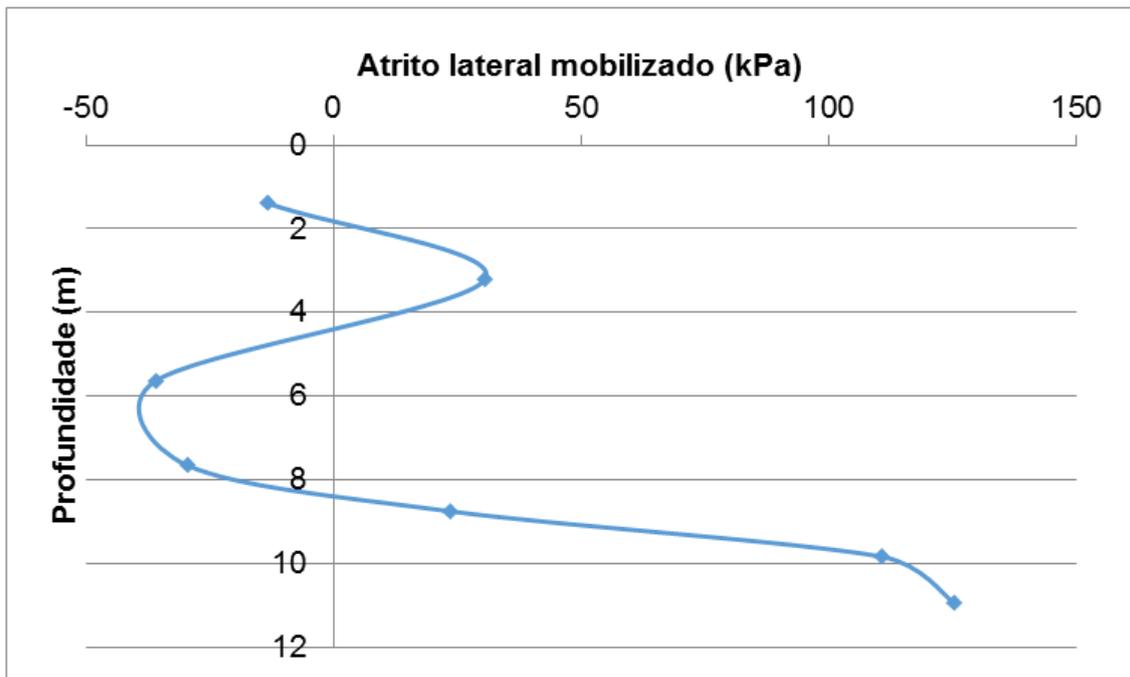


Figura 60: Atrito lateral desenvolvido com o aquecimento da estaca no Ensaio 1.

Como se pode perceber, houve movimentação da estaca para cima no topo e entre 5 e 8 metros de profundidade. Já entre 2 e 4 metros a estaca se movimentou para baixo, assim como nas profundidades superiores a 8 metros. A maior movimentação ocorreu na ponta da estaca, onde ocorreram deformações consideráveis, com atrito lateral positivo mobilizado no valor de 125,3 kPa. Já o maior atrito mobilizado negativo calculado ocorreu a uma profundidade de 5,63 metros com magnitude de 35,78 kPa.

Apesar do aumento no atrito lateral positivo ter sido o mais expressivo e ser interessante no suporte de cargas das fundações, essas mudanças devem ser incorporadas ao projeto da estaca, principalmente onde houve ocorrência de atrito lateral negativo, que pode ser prejudicial ao suporte de cargas e também pelo fato de provocarem recalque adicional da fundação.

4.2.2 Ensaio 2

Inicialmente foram traçadas as curvas que relacionam as temperaturas ao longo da profundidade da estaca, ao fim de cada dia de ensaio e passados

alguns dias do término do mesmo: um gráfico para os sensores presos à armadura e outro para os sensores imersos no concreto. Essas curvas estão apresentadas nas figuras 61 e 62.

Nesse caso também, o sensor indicado pelo número “6” é o sensor que foi disposto horizontalmente na estaca.

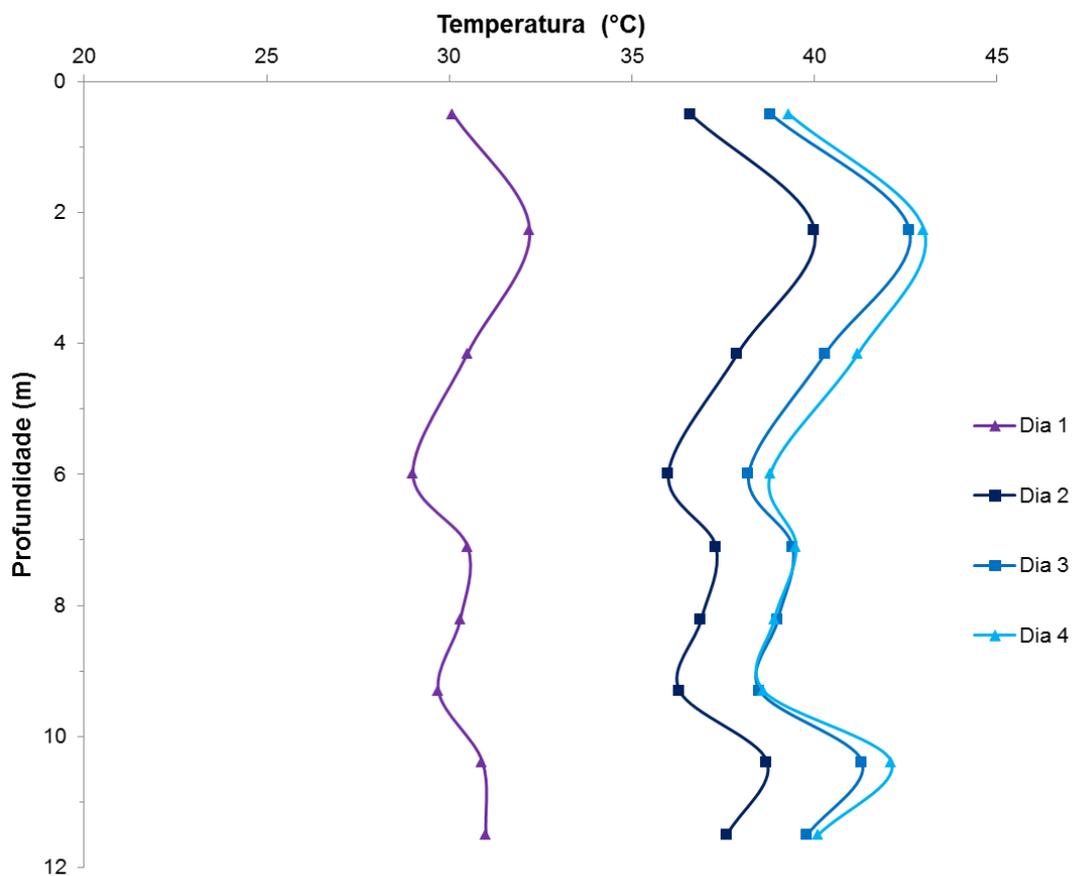


Figura 61: Temperaturas do concreto da estaca em cada dia do Ensaio 2.

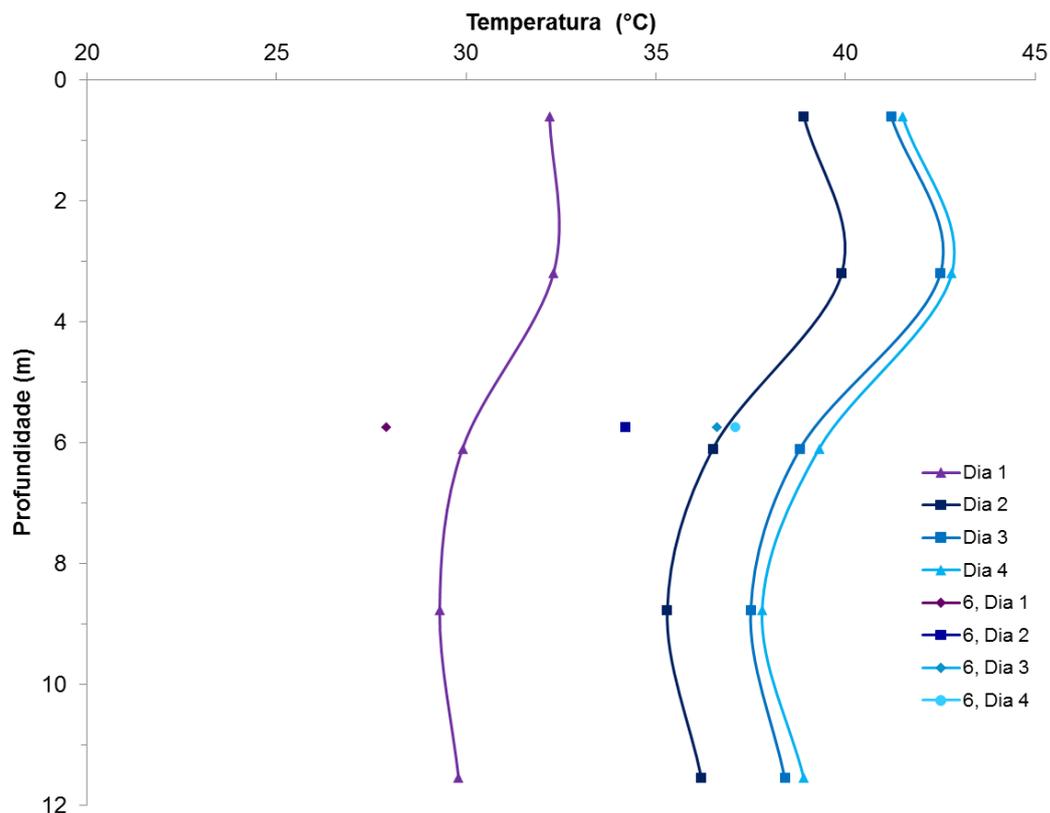


Figura 62: Temperaturas da armadura da estaca em cada dia do Ensaio 2.

No ensaio 2, também houve acréscimo de temperatura com o avançar do ensaio e também pode-se observar que, com a evolução do ensaio, a diferença entre as temperaturas em cada profundidade vai diminuindo. Nos sensores do concreto, as profundidades com maior temperatura foram as mesmas encontradas no Ensaio 1. Já as menores temperaturas ocorreram na cabeça da estaca, no centro da mesma e na profundidade de 9,30 metros. Com relação aos sensores da armadura, as temperaturas também seguiram a mesma forma do encontrado no Ensaio 1. As porções mais superiores da estaca desenvolveram as maiores temperaturas e as menores temperaturas foram encontradas no terço inferior da estaca.

No Ensaio 2 também foi observado que os sensores dispostos horizontalmente apresentaram temperaturas inferiores aos instalados verticalmente, o que corrobora a hipótese da proximidade com a tubulação trocadora ser a causa desse comportamento.

A partir dos dados de deformação medidos, e através da correção proporcionada pela Equação 17, foram calculados os incrementos de deformação térmica ao fim de cada dia de ensaio para os sensores dispostos no concreto da estaca. Nesse caso a deformação tomada como inicial também foi a deformação medida antes do início do ensaio e antes de qualquer carga térmica ser imposta à estaca, exceto a carga térmica imposta pelo Ensaio 1. Posteriormente, foram traçadas as curvas de deformação em cada dia ao longo da profundidade da estaca para o Ensaio 2, o que resultou na Figura 63. Também foi plotado nessa figura o incremento de deformação que ainda restava do Ensaio 1 na estaca, para que se pudesse analisar se toda a deformação térmica já teria sido dissipada ou não quando o Ensaio 2 foi iniciado.

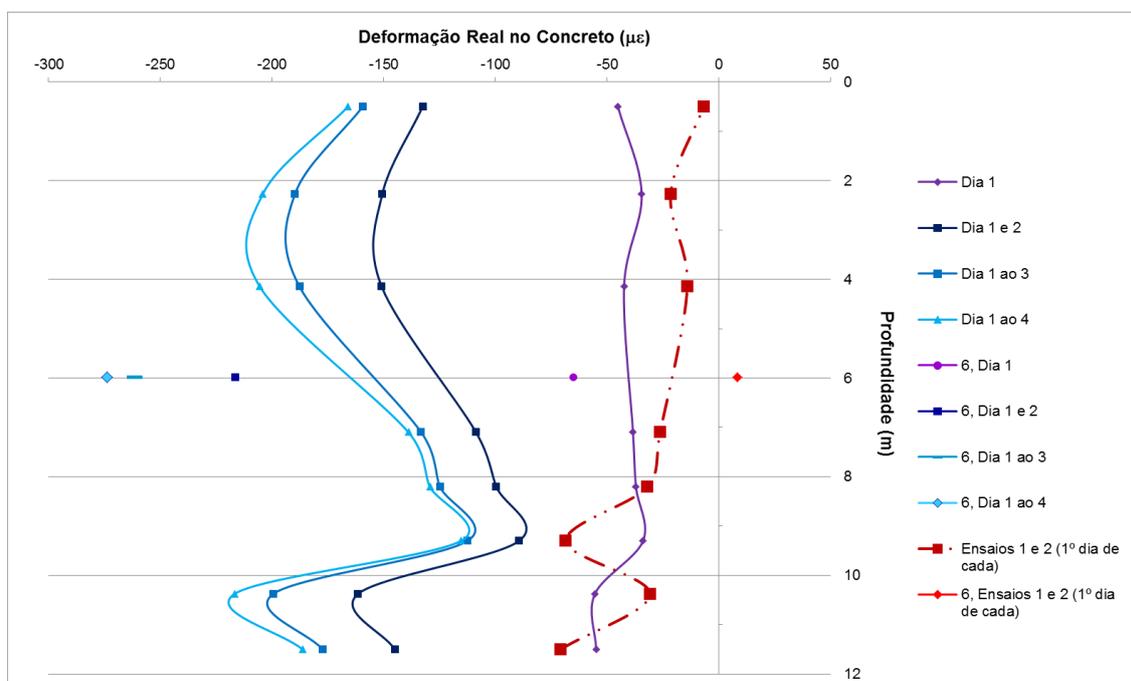


Figura 63: Incrementos de deformação ocorridos no concreto ao fim de cada dia no Ensaio 2.

A primeira a coisa notada na Figura 63 foi a curva do incremento de deformação resultante entre as primeiras medições dos Ensaio 1 e 2. Pela análise, é possível observar que a deformação desenvolvida com o Ensaio 1 não havia sido totalmente dissipada quando o Ensaio 2 foi iniciado, mesmo o Ensaio 2 tendo sido iniciado após 24 dias do término do Ensaio 1, inclusive havia uma deformação de compressão no sensor horizontal da estaca.

Ao fazer a comparação entre as curvas obtidas com os Ensaio 1 e 2 nota-se que as porções superiores da estaca (da cabeça até a profundidade de 7,10 m) e o sensor a 9,30 m apresentaram o mesmo formato de curva, sendo que o Ensaio 2 apresentou deformações ligeiramente maiores que o Ensaio 1. Especialmente, as profundidades de 8,21 m e 10,38 metros apresentaram um incremento de deformação mais expressivo no Ensaio 2 se compararmos com o Ensaio 1. E outra diferença importante entre os ensaios, é que a ponta apresentou um ligeiro decréscimo de deformação no Ensaio 2 comparado ao Ensaio 1. Há a possibilidade disso ter sido motivado por um possível acréscimo na resistência de ponta no segundo ensaio.

Além disso, as profundidades de maior deformação no concreto foram entre 2,27 e 4,15 metros e a 10,38 metros de profundidade, diferentemente do Ensaio 1 que apresentou as maiores deformações na ponta da estaca. Com o acréscimo de incremento de deformação na profundidade de 8,21 metros no Ensaio 2, o ponto de menor deformação nesse ensaio ocorreu na profundidade de 9,30 metros.

No Ensaio 2 também foi observado que o sensor horizontal imerso no concreto se deformou mais que os sensores dispostos verticalmente.

Os incrementos de deformação ocorridos nos sensores colocados na armadura também foram calculados com a Equação 18, ao fim de cada dia do ensaio 2, e estão apresentadas na Figura 64.

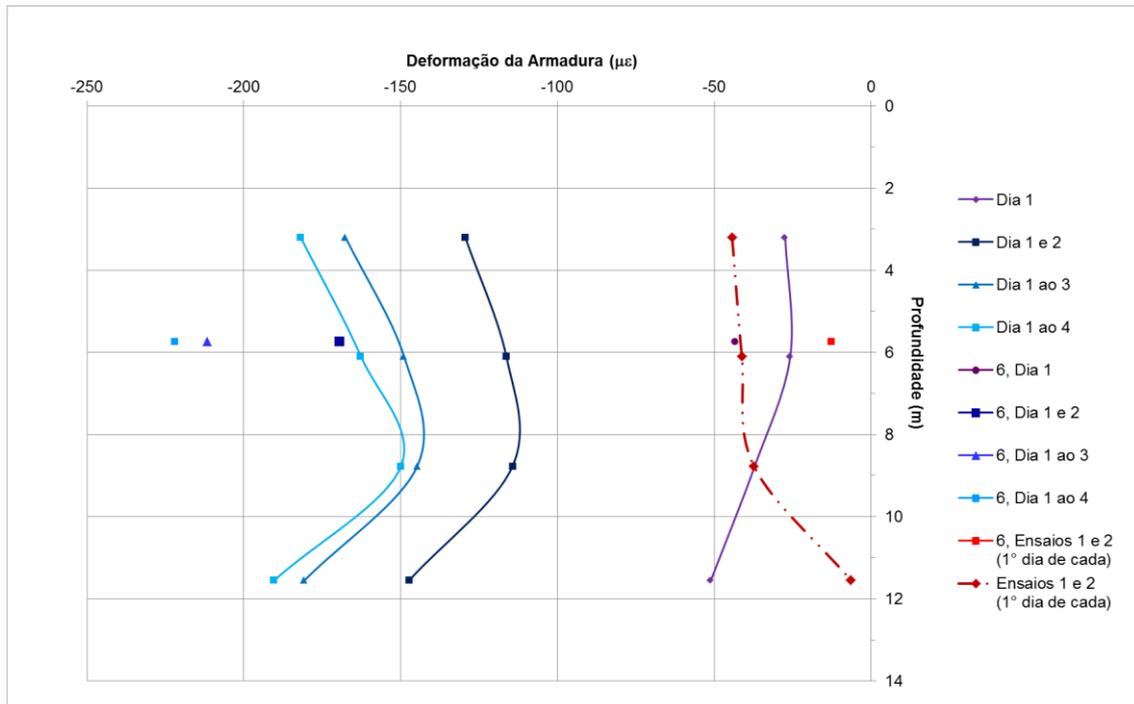


Figura 64: Incrementos de deformação ocorridos na armadura da estaca ao fim de cada dia do Ensaio 2.

Nesse caso também houve um aumento das deformações com o passar do ensaio e os incrementos de deformações foram maiores no Ensaio 2 que no Ensaio 1. A diferença de incremento mais expressiva foi observada na ponta, ou seja, ao contrário do concreto, que se expandiu menos no Ensaio 2 que no Ensaio 1, a armadura se expandiu mais no Ensaio 2 que no Ensaio 1. Na profundidade de 3,20 metros também foi observado um aumento expressivo no incremento de deformação e ao contrário disso, na profundidade de 6,10 metros, o incremento de deformação no Ensaio 2 foi suavemente maior que no Ensaio 1.

As profundidades de 11,55 e 3,20 metros foram as que experimentaram as maiores deformações de tração e as menores deformações foram encontradas na profundidade de 8,77 metros, assim como o observado para o Ensaio 1.

Posteriormente, os acréscimos de deformações térmicas no concreto foram plotados em função das variações de temperatura correspondentes. Isso foi feito separadamente para cada sensor, para que se pudessem obter os coeficientes de expansão térmica em cada profundidade. Para isso, foi feita a regressão linear da curva de cada sensor, como é apresentado na Figura 65.

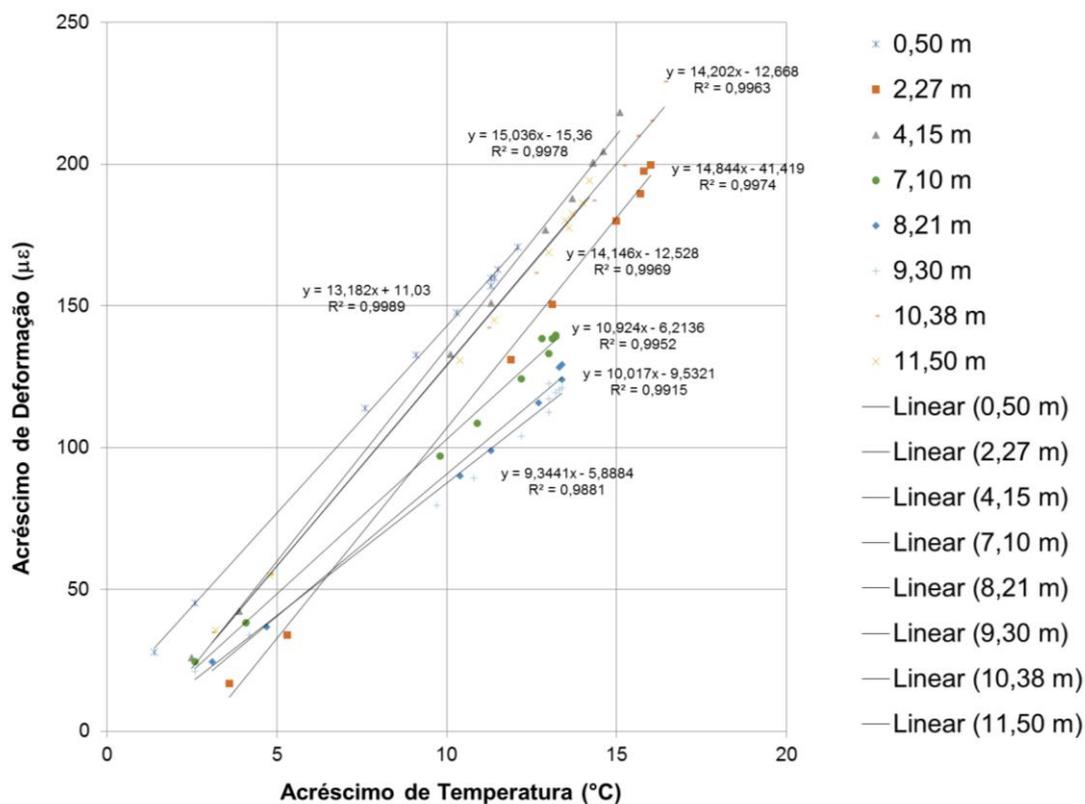


Figura 65: Obtenção dos coeficientes de expansão térmica no Ensaio 2.

Dessa forma, a partir da regressão, foram obtidos os coeficientes de expansão térmica pela inclinação de cada curva e foi possível plotar um gráfico que relaciona os coeficientes de expansão térmica com a profundidade para o Ensaio 2, como é mostrado na Figura 66.

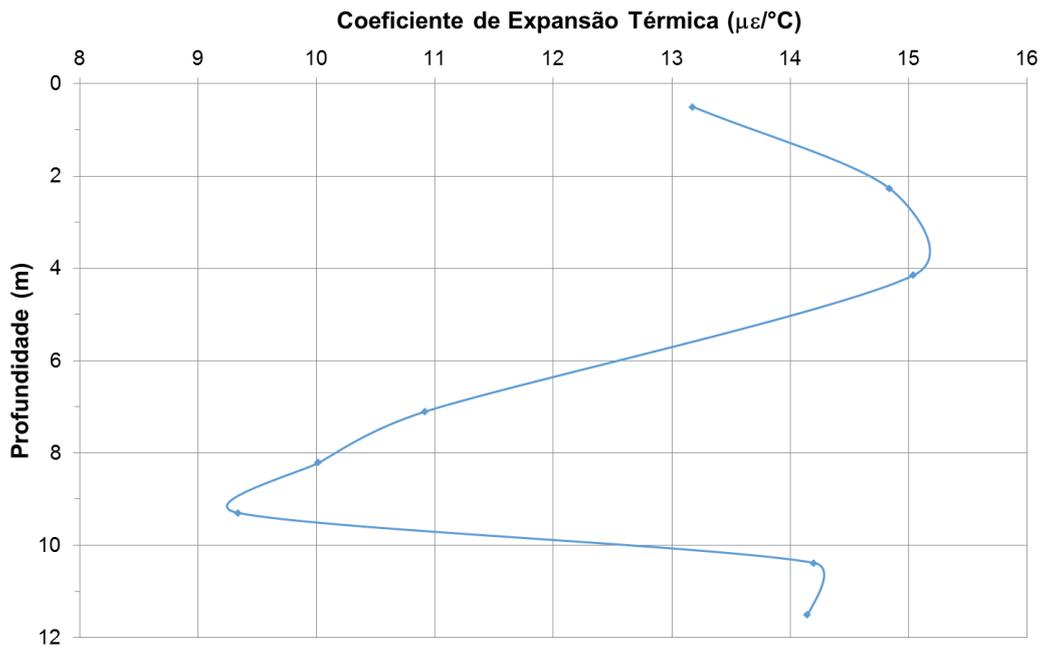


Figura 66: Coeficientes de expansão térmica mobilizados ao longo da profundidade da estaca no Ensaio 2.

Uma comparação entre os coeficientes encontrados nos ensaios 1 e 2 demonstra que houve maior deformação na parte superior da estaca no ensaio 2, já que foram obtidos coeficientes maiores nesse ensaio. Já na porção inferior da estaca houve diminuição dos coeficientes no Ensaio 2, indicando que ocorreram menores deformações no segundo ensaio, sobretudo na profundidade de 9,30 metros, que apresentou uma diminuição expressiva no coeficiente de expansão térmica.

Posteriormente, foram calculadas as tensões no interior da estaca ao ser submetida ao aquecimento através da Equação 19. As deformações utilizadas para tal fim foram as do sexto dia de ensaio, onde a estaca estava submetida à máxima carga térmica, juntamente com seus respectivos ΔT s. Assim, o resultado está apresentado na Figura 67, onde é possível observar as tensões geradas em MPa.

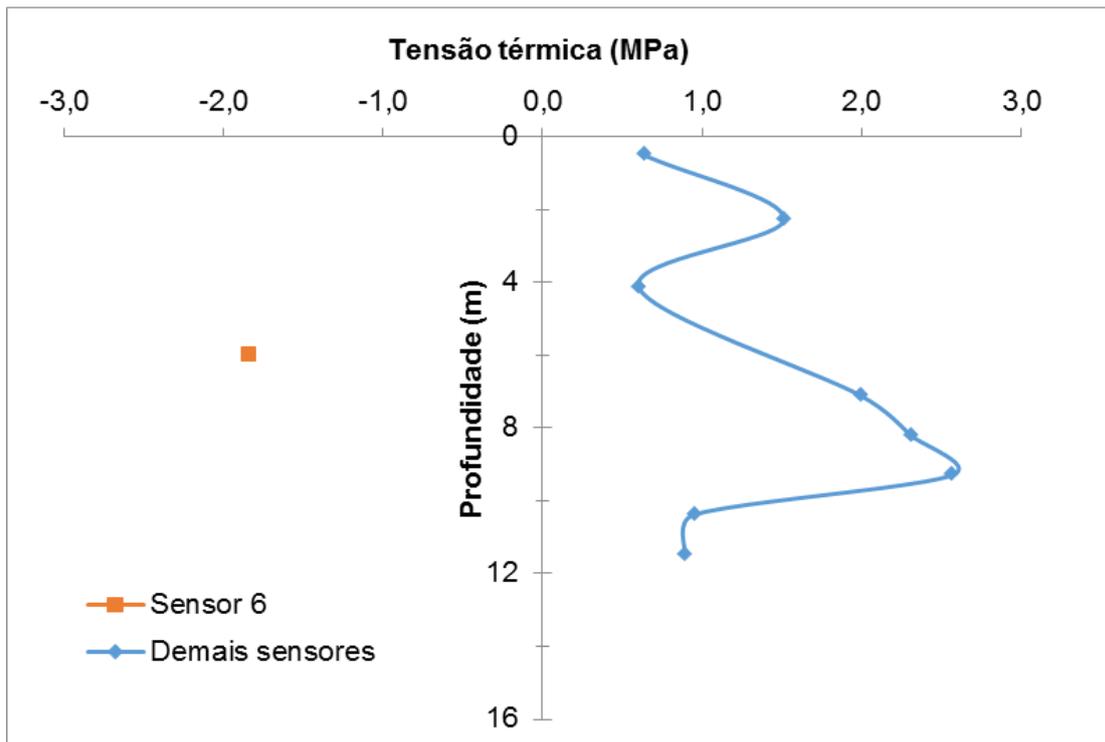


Figura 67: Tensões geradas na estaca com o Ensaio 2.

Pela análise da Figura 67, pode-se observar que a estaca ficou submetida a esforços de compressão, exceto para o sensor disposto horizontalmente, onde a estaca ficou submetida a esforços de tração de 1,84 MPa. Ao longo da estaca, o esforço máximo de compressão ocorreu na profundidade de 9,30 metros com magnitude de 2,56 MPa. O esforço de compressão verificado no Ensaio 2 é superior ao encontrado no Ensaio 1, no entanto, continua sendo um esforço bem inferior à resistência à compressão do concreto utilizado nessa estaca.

Em seguida, de posse das tensões axiais na estaca pelo Ensaio 2, pode-se calcular o atrito lateral mobilizado com o aquecimento da estaca pela Equação 20. O resultado está apresentado na Figura 68:

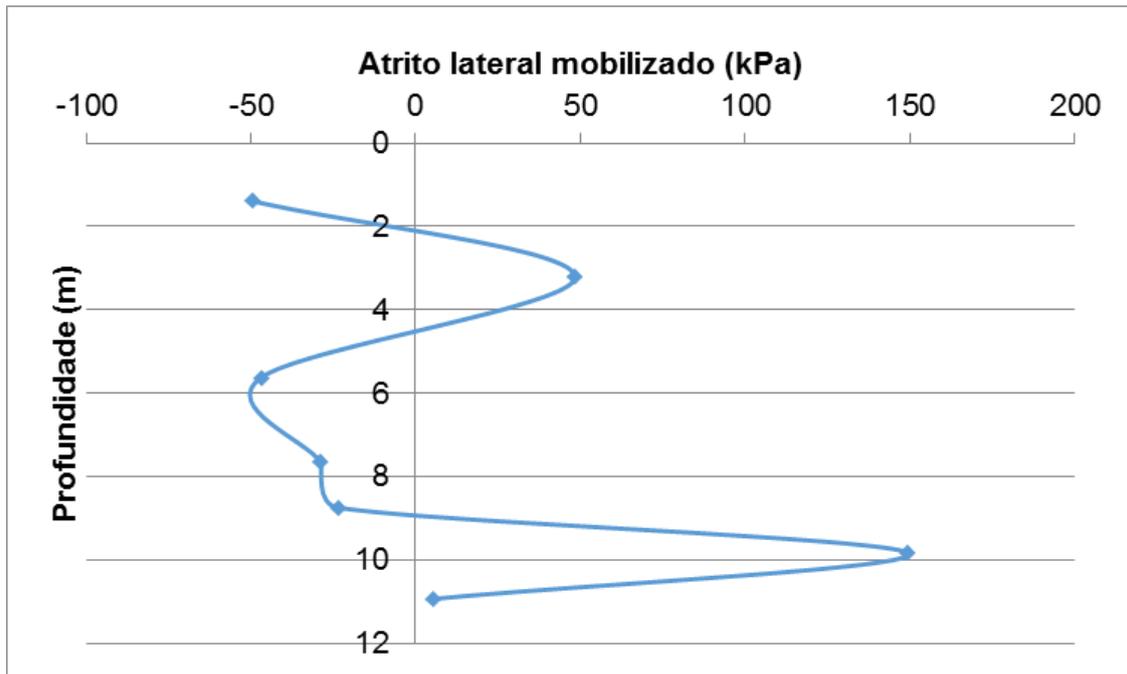


Figura 68: Atrito lateral desenvolvido com o aquecimento da estaca no Ensaio 2.

No Ensaio 2, observou-se, de maneira geral, que a direção dos movimentos da estaca foram bem parecidos e que as magnitudes da movimentação foram maiores no Ensaio 2 se as compararmos com o Ensaio 1, excetuando a ponta da estaca, que se movimentou pouquíssimo no Ensaio 2 e havia sido o ponto de maior movimentação no Ensaio 1. Provavelmente as movimentações ocorridas com o Ensaio 1 foram suficientes para gerar aumento na resistência de ponta da estaca e oferecer resistência às deformações térmicas no Ensaio 2. Além disso, no Ensaio 2, o maior atrito lateral positivo mobilizado foi de 149,36 kPa e ocorreu na profundidade de 9,84 metros e o maior atrito lateral negativo foi de 49,79 kPa e ocorreu a uma profundidade de 1,39 metros.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Pela análise do que foi desenvolvido com a pesquisa, pode-se chegar a conclusão de que os equipamentos utilizados para o T. R. T foram satisfatórios para seu devido fim, no entanto, um resultado mais eficiente seria esperado se a carga térmica depositada no ensaio fosse maior e se fosse feita uma melhor isolamento térmica dos elementos expostos ao ambiente externo. Além disso, a medição do nível d'água, que não foi possível nesse caso, seria uma importante ferramenta na análise dos resultados obtidos.

Através do ensaio de resposta térmica foi possível observar a evolução das temperaturas de entrada e de saída ao longo do ensaio e o comportamento transiente que ocorreu no início do mesmo. Também foi observada a influência da temperatura ambiente na carga depositada durante o ensaio, através dos picos ocorridos nas temperaturas de entrada e saída juntamente com os picos ocorridos na temperatura da placa do Arduino, que estava submetida à temperatura ambiente.

Com os T. R. T.s realizados, foram obtidas condutividades térmicas elevadas, o que indica uma alta eficiência das trocas térmicas entre o fluido transportador de calor e o solo. Também foi observado que o aumento da vazão e da carga térmica depositada no ensaio, juntos, geraram acréscimo na condutividade térmica, o que aumenta a eficiência das trocas térmicas entre o fluido portador de calor e o solo.

Já a temperatura média do solo não perturbado foi de aproximadamente 30°C, o que pode fazer com que a utilização das estacas geotérmicas não seja tão vantajosa neste local para o resfriamento de ambientes, já que a temperatura média do solo é alta para esta finalidade.

Com relação ao comportamento termomecânico, o aquecimento da estaca gerou inicialmente a dilatação da mesma, o que acarretou em deformações de tração em seu interior. A maior dilatação ocorreu na ponta da estaca no Ensaio 1, o que pode ser atribuído ao processo executivo da mesma, que pode ter deixado o solo pouco consolidado na ponta e assim houve uma menor restrição aos deslocamentos. Também foram observadas grandes deformações no terço

superior da estaca. No ensaio 2 as maiores deformações também ocorreram no terço superior e próximo à ponta. No entanto, na ponta especificamente, ocorreram menores deformações que no ensaio 1, possivelmente devido à consolidação gerada com o aquecimento do solo, por possíveis deformações residuais decorrentes do primeiro ensaio ou ainda pelo deslocamento da ponta que, por ter se movido pra baixo, pode ter chegado a um solo mais resistente.

As deformações ocorridas na estaca no Ensaio 1 não haviam sido totalmente dissipadas quando o Ensaio 2 foi iniciado.

Com relação às tensões ocorridas na estaca, estas foram de compressão na maior parte da estaca, sendo de tração apenas na ponta e no sensor disposto horizontalmente, onde provavelmente não ocorreu restrição às deformações de tração durante o Ensaio 1. No ensaio 2, só foi observada tensão de tração no sensor disposto horizontalmente. Com relação às magnitudes das tensões, tanto de compressão, como de tração, foram significativamente inferiores à resistência da estaca.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, ficam as sugestões quanto à medição do nível d'água, que é importante na interpretação dos resultados e quanto à isolamento térmica, que deve permitir respostas de temperatura de entrada e de saída com menores oscilações. Também seria interessante uma melhoria na eficiência térmica, com a utilização de uma resistência com maior potência. Além disso, é importante ensaiar a estaca geotérmica em condições mais restritas para avaliar as tensões internas geradas, que possivelmente serão maiores que as ocorridas nesse caso.

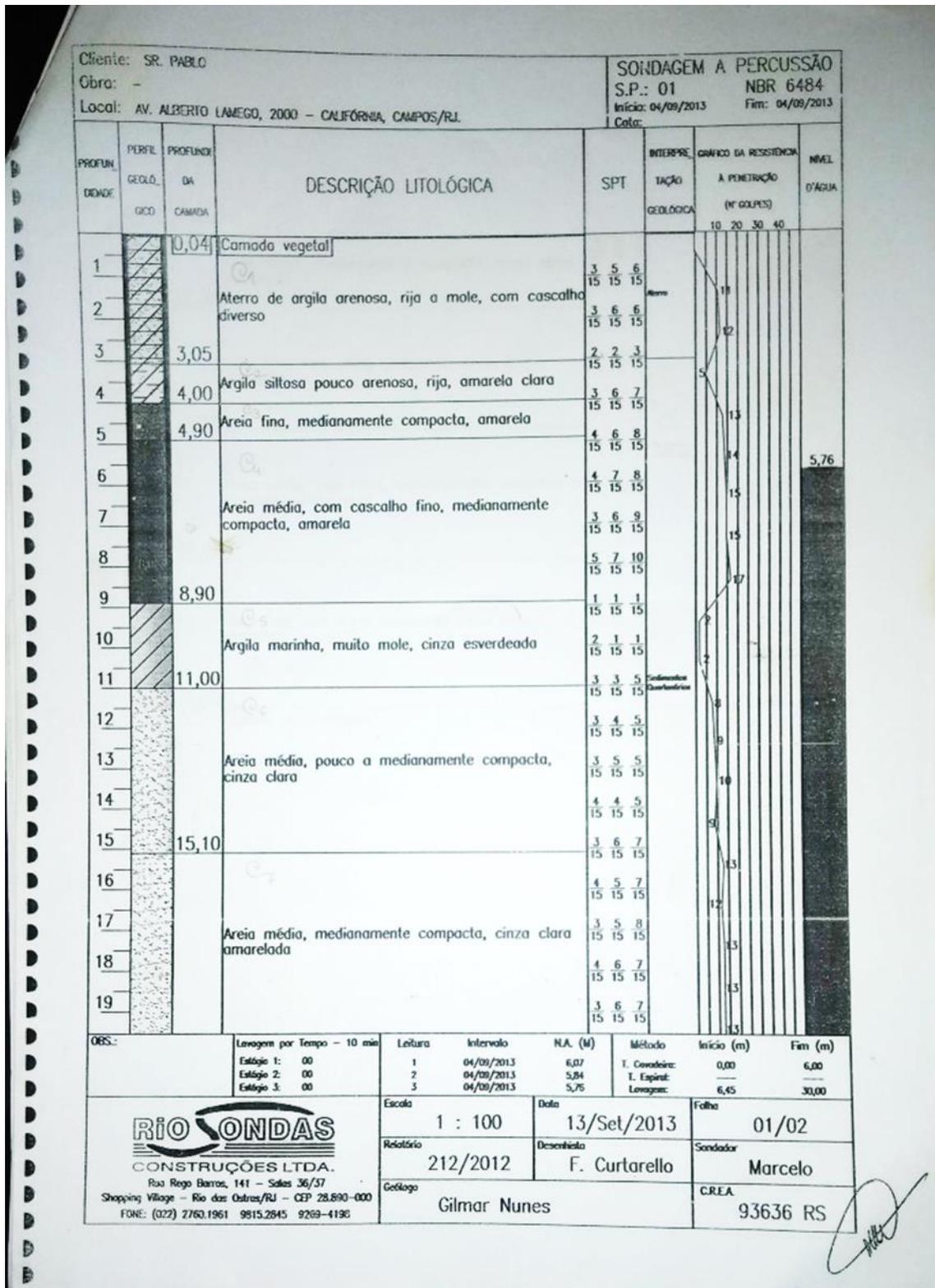
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Koene, F., Geelen, C. (2000) Energy piles as an efficient way to store heat. *CADDET Energy Efficiency*, 4-6.
- 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.
- Laloui, L., DiDonna, A. (2011) Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Civil Engineering*. 164: 184-191.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2014. (2015). <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energética+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2> em 15/04/2015.
- Brandl, H. (2006). Energy Foundations and Other Thermo-Active Ground Structures. *Revista Géotechnique*, vol. 56 (2): 81 – 126.
- Gehlin, S. (2002). *Thermal response test: Method Development and Evaluation*. Tese (Doutorado). Lulea - Norrbotten, Suécia, Luleå University of Technology, 191 p.
- 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.
- Bandeira Neto, L. (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.; Soga, A. K.; Amis, T.; Davidson, T.; 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.

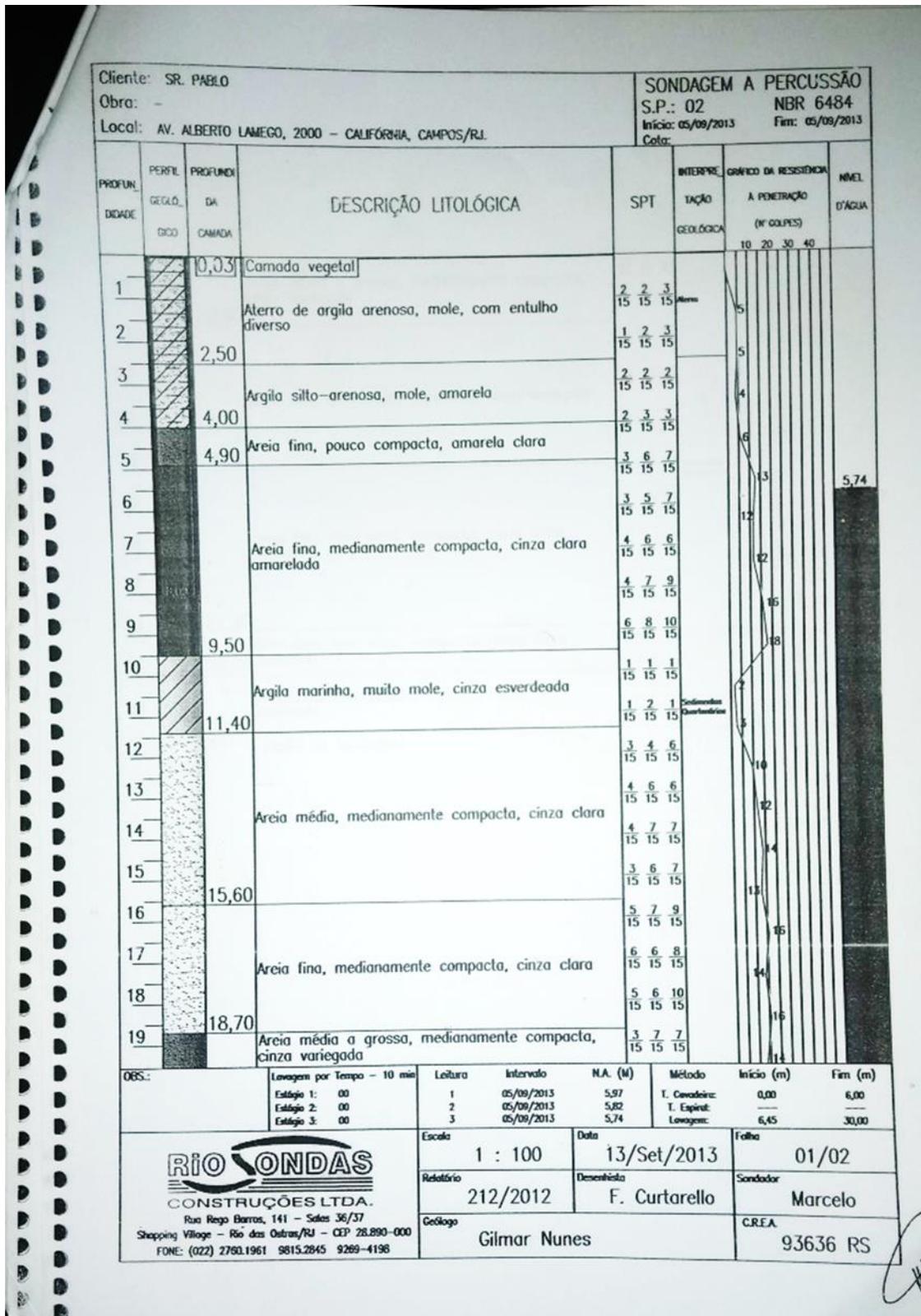
- Murphy, K. D.; McCartney, J. S.; Henry, K. S. (2013) Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*.
- Comitê Europeu de Normatização/Comissão Técnica (2011) Geotechnical investigation and testing — Geothermal testing — Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger: CEN/TC 341 N525.
- Lhendup, T.; Aye, L.; Fuller, R. J. (2014) In-situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. *Elsevier*. 73:285-293.
- Hamada, Y.; Saitoh, H.; Nakamura, M.; Kubota, H.; Ochifuji, K. (2007) Field performance of an energy pile system for space heating. *Elsevier*. 39:517-524
- Austin, W. A. (1998) Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties. Tese (Mestrado) - Oklahoma - Oklahoma, Oklahoma State University.
- Roth, P.; Georgiev, A.; Busso, A.; Barraza, E. (2004) First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America. *Elsevier*. 29:1947-1963.
- Bourne-Webb, P. (2013) An overview of observed thermal and thermo-mechanical response of piled energy foundations. Anais do European Geothermal Congress, Pisa.
- Amatya, B. L.; Soga, K.; Bourne-Webb, P. J.; Amis, T.; Laloui, L. (2012) Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Geotechnique*. 6:503-519.
- Dickinson; M.H.; Fanelli, M. *What is Geothermal Energy?*. Disponível em: <<http://www.iga.igg.cnr.it/geothermal.php>> Acesso em: 2001.
- Murphy, K. D., McCartney, J. S., Henry, K. S. (2014) Impact of Horizontal Run-out Length on the Thermal Response of Full-Scale Energy Foundations. *Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234*, 2715-2724.
- Jury, W. A.; Gardner, W.R.; Gardner, W.H. *Soil physics*. 5ª edição. Nova York: John Wiley & Sons, 1991, 352 p.

- 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.
- Laloui, L.; Nuth, M.; Vulliet, L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30:763–781, 2006.
- Boennec, O. Shallow ground energy systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Energy 161; 2008. EN2: p.57–61.
- Moel, M.; Bach, P. M.; Bouazza, A.; Singh, R. M.; Sun, J. O. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Elsevier*, Australia, 15 julho 2010.
- Adam, D.; Markiewicz, R. Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke. *Osterr. Ing. Archit. Z.* v. 147, n. 4, 5 e 6, 2002.
- You, S.; Cheng, X.; Guo, H.; Yao, Z. In-situ Experimental Study of Heat Exchange Capacity of CFG Pile Geothermal Exchangers. *Energy and Buildings*, v. 79, p. 23-31, agosto 2014.

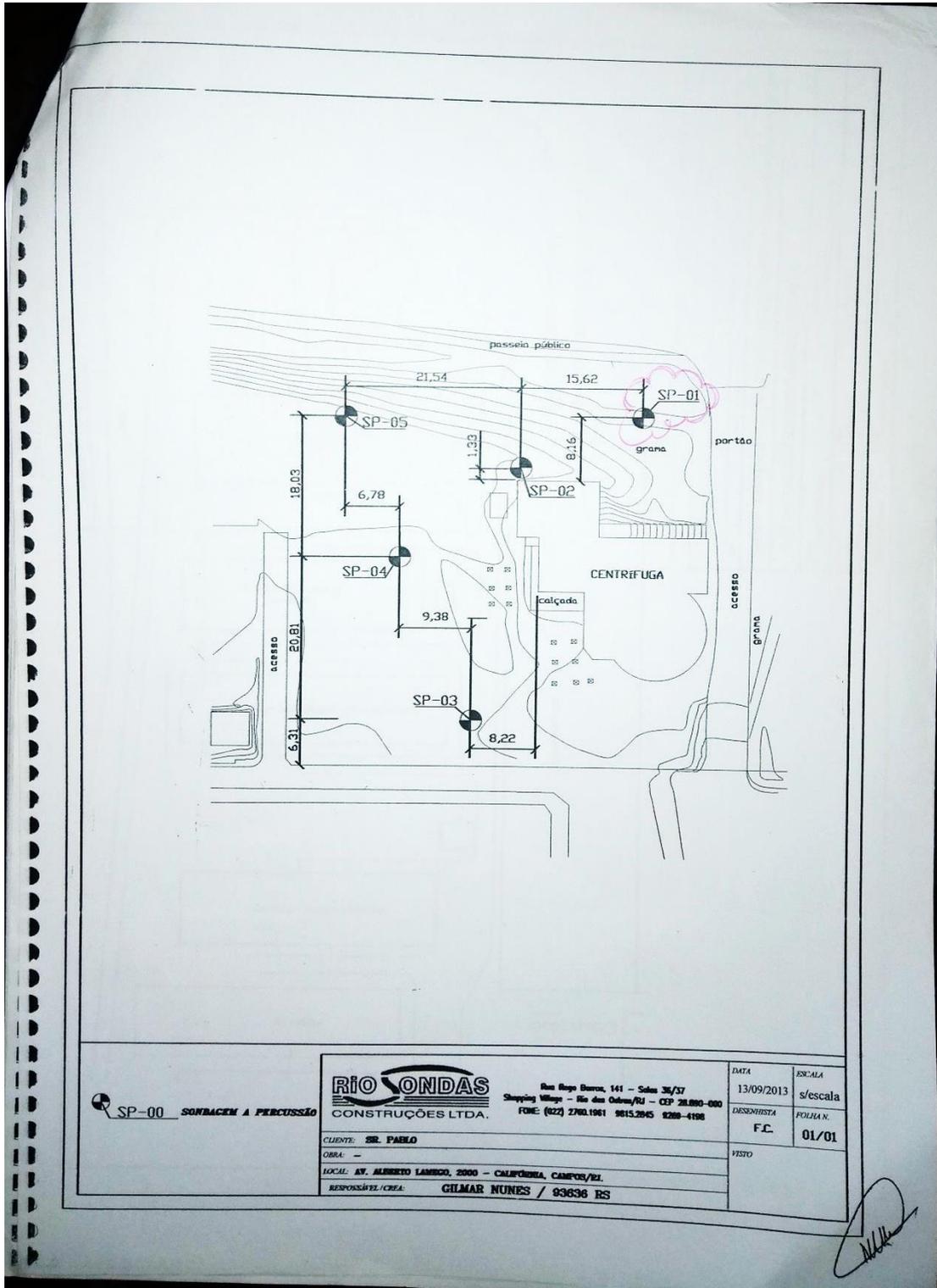
ANEXO A - Sondagem SPT 1



ANEXO B - Sondagem SPT 2



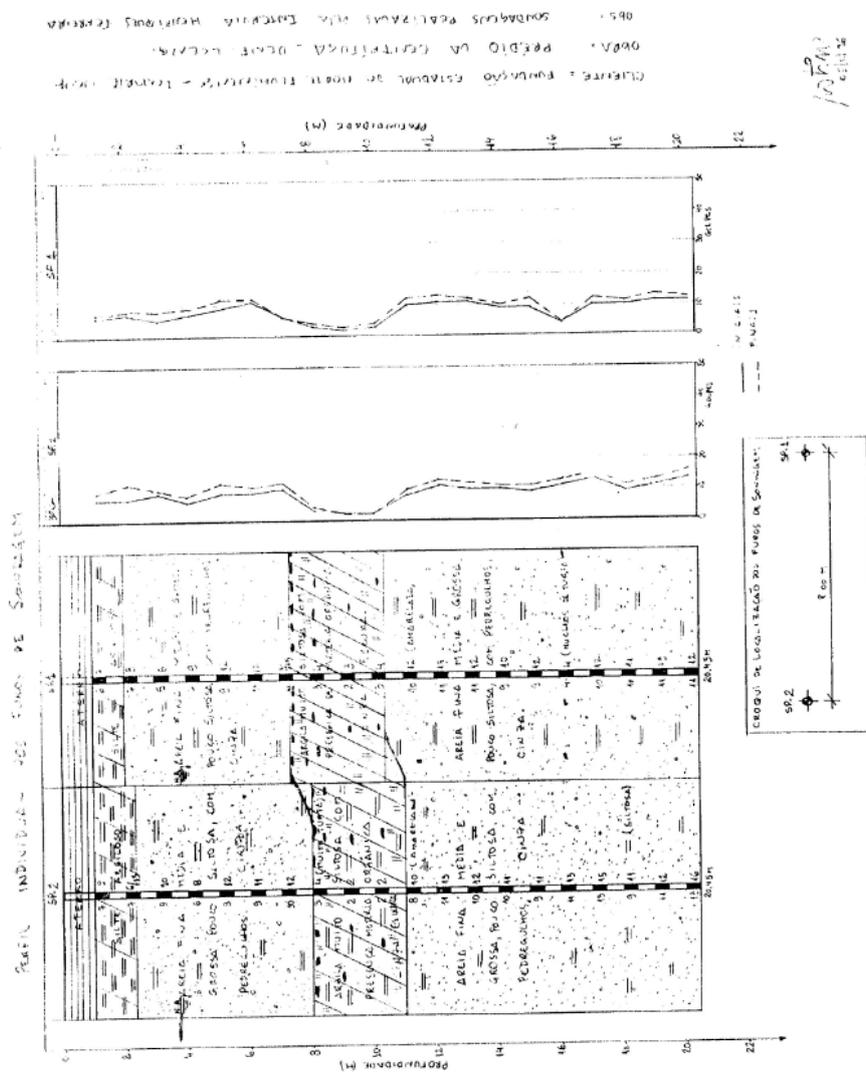
ANEXO C - Localização das sondagens 1 e 2



	Rua Ruy Barata, 141 - Sala 36/37 Shopping Village - Rio das Ostras/RJ - CEP 28.080-000 FONE: (022) 2780.1961 9815.2845 8288-4198	DATA	ESCALA
		13/09/2013	s/escala
		DESENHISTA	FOLHA N.
		F.C.	01/01
CLIENTE: SR. PABLO OBRA: - LOCAL: AV. ALBERTO LAMICO, 2000 - CALIFORNIA, CAMPO DELÍZIA RESPONSÁVEL/CREA: GILMAR NUNES / 93636 RS	VISTO		

[Handwritten signature]

ANEXO D - Sondagem SPT 3



10/04/2012