

**ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTACA EM ESTACA  
GEOTÉRMICA SUBMETIDA AO CARREGAMENTO TÉRMICO**

**IGOR CONRADO DA SILVA CAETANO**

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF**

Campos dos Goytacazes, julho de 2019



# **ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTACA EM ESTACA GEOTÉRMICA SUBMETIDA AO CARREGAMENTO TÉRMICO**

**IGOR CONRADO DA SILVA CAETANO**

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

Orientador: Paulo Cesar de Almeida Maia

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO– UENF**

Campos dos Goytacazes, julho de 2019

# **ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTACA EM ESTACA GEOTÉRMICA SUBMETIDA AO CARREGAMENTO TÉRMICO**

**IGOR CONRADO DA SILVA CAETANO**

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

Aprovado em 11 de julho de 2019.

Comissão Examinadora:

---

Prof°. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha, D.Sc., USP

---

Prof°. Sérgio Tibana, D.Sc., UENF

---

Prof°. Fernando Saboya Albuquerque Jr., D.Sc., UENF

---

Prof°. Paulo Cesar de Almeida Maia, D.Sc., UENF (Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela força em continuar persistindo diariamente na luta pelos meus objetivos.

Agradeço a minha família pelo apoio e motivação.

Ao meu orientador Paulo Maia pela paciência e atenção, além do conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Fernando Saboya por toda contribuição e atenção durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação pelos momentos de diversão e aprendizado compartilhados.

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

## RESUMO

Uma nova opção de utilização das fundações profundas tem sido considerada, de modo que além do suporte estrutural e transferência do carregamento mecânico ao solo elas possam ser usadas como elementos trocadores de calor com o solo. As fundações utilizadas com essa finalidade são conhecidas como estacas geotérmicas. À medida que os estudos das estacas geotérmicas avançaram, viu-se a necessidade do conhecimento do comportamento do conjunto solo-estaca quando submetidos ao carregamento térmico e mecânico. Tendo em vista as deformações e tensões induzidas termicamente nas estacas geotérmicas, o estudo do seu comportamento geomecânico tornou-se relevante devido ao conhecimento ainda prematuro quanto ao reflexo da aplicação de carregamento térmico nos projetos das fundações. Cada vez mais se procura entender o comportamento das estacas geotérmicas de modo a permitir o seu dimensionamento adequado. Assim, o objetivo geral desta pesquisa é o estudo do comportamento geomecânico de estaca submetida a um carregamento térmico para análise dos mecanismos de interação solo-estaca. Mais especificamente, analisar a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos de uma estaca raiz submetida à expansão por troca de calor. Os resultados obtidos no carregamento térmico da estaca geotérmica evidenciaram o aumento de temperatura e o surgimento de deformações e tensões termicamente induzidas em seu interior. Através das leituras dos deslocamentos da cabeça da estaca e das deformações obtidas pelos extensômetros durante o ensaio foi possível concluir que houve variação da cota do ponto nulo, que é o ponto de deslocamento absoluto da estaca igual à zero, com a variação de temperatura. Uma vez encontrada a posição do ponto nulo e a variação de temperatura na cota, foi possível a obtenção de uma curva carga-recalque para o carregamento térmico aplicado. Além disso, a aplicação de um modelo de transferência de carga não se mostrou satisfatório, especificamente, para o ensaio realizado nesta pesquisa.

**Palavras-Chaves:** Estaca geotérmica, carregamento térmico, energia renovável, avaliação termomecânica, interação solo-estaca.

## **ABSTRACT**

A new option of using deep foundations has been considered, beyond the structural support and transfer of mechanical loading to the ground they can be used as heat exchanger elements with the soil. The foundations used for this purpose are known as energy foundations. As the studies of the energy foundations advanced, it was necessary to evaluate of its behavior under thermal and mechanical loadings. Considering the thermal strain and stresses developed in the energy foundations, the study of its thermo-mechanical behavior became relevant due to the premature knowledge about the reflex of thermal loading on foundation design. So, the main objective of this research is the study of the thermo-mechanical behavior of an energy pile under thermal loading for the analysis of its interaction with the ground. Specifically, analyze the thermal induced strain and stresses distribution in a cast-in-place pile under temperature variation. The results obtained in the research showed the increase of temperature and the thermally induced strain and stresses in the energy pile. Through the readings of the head displacements and strain obtained by the strain gauges during the test it was possible to conclude that the null point location, which is the point with zero displacement, changed with the temperature increase. Once the null point positions were obtained along with and the temperature variation, it was possible to obtain a load-displacement curve for the applied thermal loading. In addition, the application of a load transfer model was not satisfactory, specifically, for the test carried out in this research.

**Keywords:** Energy foundation, thermal loading, sustainable energy, thermo-mechanical evaluation, soil-pile interaction.

## SUMÁRIO

1-	Introdução.....	13
1.1 -	Motivação.....	13
1.2 -	Objetivos .....	15
2-	Revisão Bibliográfica .....	16
2.1 -	Estacas Geotérmicas.....	16
2.2 -	Deformações e Tensões Termicamente Induzidas .....	18
2.3 -	Ponto Nulo .....	23
2.4 -	Influência da Temperatura no Comportamento do Solo.....	26
2.5 -	Modelos de Transferência de Carga .....	29
2.6 -	Prova de Carga .....	33
2.7 -	Histórico de ensaios na estaca geotérmica da UENF .....	35
3-	Metodologia e Métodos .....	39
3.1 -	Ensaio Experimental .....	39
3.2 -	Comportamento Termomecânico do Ensaio Experimental .....	46
3.3 -	Modelo de Transferência de Carga de Chen e McCartney (2016) ..	48
4-	Resultados e Análises .....	58
4.1 -	Resultados do comportamento termomecânico .....	58
4.2 -	Análise do Ponto Nulo.....	68
4.3 -	Análise do Ponto Nulo com aplicação do Modelo de Chen e McCartney (2016) .....	73
4.4 -	Prova de Carga Térmica .....	75
4.5 -	Aplicação do modelo de transferência de carga .....	77
5-	Conclusão e Sugestões .....	81
6-	Referências Bibliográficas .....	83
	Anexo I.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de um sistema de estacas geotérmicas. (Laloui et al. 2006).....	13
Figura 2 – Esquema representativo dos elementos de uma estaca geotérmica (Sutman, 2016).....	17
Figura 3 - Arranjos de tubulação trocadora de calor no interior das estacas geotérmicas (Hamada et al. 2007). ....	18
Figura 4 - Distribuição das tensões ao longo da sob carregamento mecânico, térmico e térmico juntamente com mecânico (Laloui et al., 2006).....	20
Figura 5 - 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).....	21
Figura 6 - Efeito do carregamento térmico e do solo 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). ....	22
Figura 7 - Mudanças induzidas termicamente na tensão axial e associadas ao atrito lateral mobilizado entre o solo e a estaca. (Bourne-Webb et al., 2013). ....	24
Figura 8 - Aquecimento de amostras de "Kaolin clay" com diferentes graus de pré-adensamento. (adaptada de Cekerevac e Laloui, 2004).....	28
Figura 9 - Comparativo experimental e numérico de ciclos de aquecimento-resfriamento em argilas com diferentes graus de pré-adensamento. (Laloui e Françõis, 2009). ....	28
Figura 10 - Discretização de Knewllwof et al. (2011) para análise em diferenças finitas. (a) deslocamentos por carga mecânica; (b) forças externas para carga mecânica; (c) deslocamentos para carga térmica; (d) forças externas para carga térmica.....	30
Figura 11 - Discretização para análise em diferenças finitas segundo Chen e McCartney (2016).....	31
Figura 12 – Curva carga deslocamento: (a) com fadiga na interface para $\rho$ e $\xi$ igual a 1; (b) sem fadiga quando $\rho$ e $\xi$ igual a 3. (Suryatriyastuti et al. 2014).....	32
Figura 13 - Sistema de reações pelo método bidirecional. ....	33

Figura 14 - Curva carga x deslocamento de topo e base - Ensaio Bidirecional. (Souza Cruz et al. 2015). .....	34
Figura 15 - Curva carga x recalque ajustada do ensaio bidirecional. (Souza Cruz et al. 2015). .....	35
Figura 16 - Temperatura dos termopares do concreto durante o primeiro ensaio (Ferreira, 2017). .....	36
Figura 17 - Temperatura dos termopares do concreto durante o segundo ensaio (Ferreira, 2017). .....	37
Figura 18 - Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o primeiro ensaio (Ferreira, 2017). .....	37
Figura 19 - Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o segundo ensaio (Ferreira, 2017). .....	38
Figura 20 - Posição do furo de sondagem e do nível d'água em relação à estaca geotérmica. ....	39
Figura 21 - (a) armadura e sistema trocador de calor no interior da estaca; (b) extensômetro com medidor de temperatura na armadura; (c) extensômetro com medidor de temperatura do concreto; (d) leitor de corda vibrante. (Ferreira, 2017). .	41
Figura 22 - Disposição dos extensômetros e termopares no interior da estaca geotérmica: (a) concreto; (b) armadura. ....	42
Figura 23 – Equipamentos auxiliares utilizados na realização do ensaio experimental. (Ferreira, 2017). .....	43
Figura 24 - Proteção com lona plástica na viga de referência utilizada na medição do deslocamento da cabeça da estaca. ....	44
Figura 25 - Apoio da viga de referência lubrificada no contato entre a viga e o apoio. ....	45
Figura 26 - Monitoramento das leituras de deslocamento da cabeça da estaca. ....	46
Figura 27 – Curva resistência mobilizada por deslocamento: (a) curva Q-z; (b) curva T-z. (Chen e McCartney, 2016). ....	50
Figura 28 - Variação de temperatura dos termopares do concreto durante o ensaio. ....	59
Figura 29 - (a) Temperatura dos termopares do concreto durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o ensaio. ....	60

Figura 30 - (a) Temperatura dos termopares do aço durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do aço durante o ensaio.....	62
Figura 31 - (a) Temperatura dos termopares do aço (linha contínua) e do concreto (linha tracejada) durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do aço (linha contínua) e do concreto (linha tracejada) durante o ensaio.....	63
Figura 32 - (a) Tensão térmica mobilizada (MPa); (b) Atrito mobilizado (kPa). .....	65
Figura 33 - Aumento de deformação térmica axial pela variação de temperatura de cada extensômetro axial do concreto para obtenção dos coeficientes de expansão térmica. ....	67
Figura 34 - Coeficientes de expansão térmica.....	67
Figura 35 - Grau de liberdade pelo aumento de temperatura. ....	69
Figura 36 - (a) Grau de liberdade; (b) Deslocamentos a partir do deslocamento medido na cabeça da estaca (mm). ....	70
Figura 37 - Deslocamentos medidos da cabeça da estaca e deslocamentos calculados da ponta inferior durante o ensaio. ....	71
Figura 38 - Variação do Ponto Nulo durante o ensaio. ....	72
Figura 39 - Esquemas para análise da variação do ponto nulo utilizando o modelo de transferência de carga de Chen e McCartney (2016): (a) resistência crescente; (b) resistência crescente com camada pouco resistente entre 2 e 4m; (c) resistência crescente com camada pouco resistente entre 8 e 10m. ....	74
Figura 40 - Curva carga vs deslocamento de topo e base - carregamento térmico. ....	76
Figura 41 - Curva carga vs recalque - carregamento térmico.....	77
Figura 42 - Resultados da análise com o uso do modelo de Chen e McCartney (2016) com resistência de ponta calculada pelo método de Teixeira: (a) Deformação Térmica; (b) Tensão Térmica. ....	78
Figura 43 - Resultados da análise com o uso do modelo de Chen e McCartney (2016) com resistência de ponta calculada pelo método de Aoki-Velloso: (a) Deformação Térmica; (b) Tensão Térmica.....	79

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros de forma das curvas T-z e Q-z obtidos por Murphy et al. (2015) e Murphy e McCartney (2015). (Chen e McCartney, 2016).....	50
Tabela 2 - Peso específico de solos argilosos. (Godoy, 1972).....	52
Tabela 3 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972).....	52
Tabela 4 – Obtenção de parâmetros representativos do solo. ....	52

## 1- INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial tem impulsionado estudos voltados ao aumento da eficiência na geração de energia e ao surgimento de opções energéticas mais sustentáveis. Conseqüentemente, nas últimas décadas, os estudos relacionados à capacidade térmica do solo e sua condutibilidade ganharam notoriedade.

Assim, uma nova opção de utilização das fundações profundas tem sido considerada. Além do suporte estrutural e transferência do carregamento mecânico ao solo, estudos recentes relatam o potencial energético do uso das fundações na troca de calor com o solo (Ennigkeit e Katzenbach, 2001; Brandl, 2006; Hamada *et al.*, 2007). As fundações utilizadas com essa finalidade são conhecidas como estacas geotérmicas.

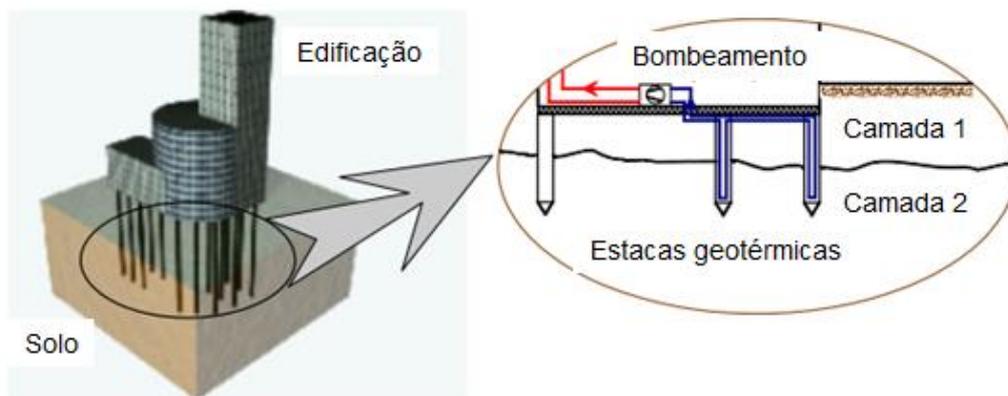


Figura 1 - Esquema representativo de um sistema de estacas geotérmicas. (Laloui *et al.* 2006).

### 1.1 - Motivação

Estacas geotérmicas são elementos de dupla funcionalidade usados como elemento estrutural e sistema trocador de calor, que utilizam energia geotérmica do solo. A utilização de energia geotérmica por meio de elementos estruturais com a

finalidade de aquecimento ou resfriamento foi discutida por Brandl (2006) e Laloui *et al.* (2006), onde eles apontaram estacas geotérmicas como um possível uso.

Quando aquecida ou resfriada a estaca geotérmica vai se expandir ou se contrair, respectivamente. Tensões induzidas termicamente são desenvolvidas além das tensões impostas pelo carregamento mecânico. Como a estaca está embutida no solo, o carregamento térmico gera algumas particularidades ao comportamento da estaca. A principal é a expansão ou contração axial em relação a um “ponto nulo” (Knellwolf *et al.*, 2011), que é o ponto de deslocamento zero localizado a certa profundidade que depende das camadas de solo circundante e as condições de restrição na ponta (Bourne-Webb *et al.*, 2013). Como consequência da expansão ou contração da estaca, deslocamentos irão se desenvolver a partir do ponto nulo mobilizando resistência lateral e de ponta, levando a uma reorganização das tensões na fundação. Por exemplo, quando uma estaca da fundação de um edifício é aquecida, a seção acima do ponto nulo terá deslocamento ascendente, aliviando a resistência lateral mobilizada pelo carregamento mecânico, a seção abaixo do ponto nulo terá deslocamento descendente mobilizando resistência lateral e de ponta da mesma maneira que o carregamento mecânico. As condições de restrição da fundação são o mais importante fator quanto à distribuição e magnitude das deformações e tensões induzidas termicamente, ou seja, a resistência do solo circundante, a rigidez da resistência de ponta e a carga mecânica no topo da estaca (Laloui *et al.*, 2006; Bourne-Webb *et al.*, 2009).

O conhecimento quanto à influência da variação da temperatura no comportamento do solo em torno da estaca geotérmica também deve ser considerado para um melhor entendimento do comportamento termomecânico. Uma variação de temperatura imposta no solo pode resultar em mudança de volume com consequente aumento ou diminuição da poropressão e rearranjo da estrutura do solo, a resistência de contato entre as partículas poderá também ser modificada (Campanella e Mitchell, 1968; Boudali *et al.*, 1994). Devido a sua elevada permeabilidade, solos granulares parecem não ser afetados pela variação de temperatura (Hueckel *et al.*, 2009; Loveridge *et al.*, 2017). A presença de solos finos, no entanto, demanda alguma atenção na aplicação das estacas geotérmicas. Variação de temperatura em solos finos podem ocasionar consolidação térmica e

diminuir a tensão efetiva devido à geração de poropressão (Laloui *et al.*, 2014; Loveridge *et al.*, 2017).

Portanto, a utilização de fundações profundas com o objetivo de utilizar energia geotérmica tem trazido questionamentos quanto às deformações e tensões adicionais e seus reflexos no projeto estrutural. Em outras palavras, cada vez mais se procura entender o comportamento das estacas geotérmicas de modo a permitir o seu dimensionamento adequado. Assim, o estudo quanto ao seu comportamento torna-se importante na obtenção de informações adicionais que poderão ser utilizadas em projetos de diferentes configurações de estacas geotérmicas em diferentes maciços de fundação.

## **1.2 – Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é o estudo do comportamento geomecânico de estaca submetida a um carregamento térmico para análise dos mecanismos de interação solo-estaca. Mais especificamente, analisar a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos de uma estaca raiz submetida à expansão por troca de calor. Além disso, foi possível a obtenção de uma curva carga-recalque, semelhante às curvas de prova de carga, na aplicação do carregamento térmico.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, estão apresentados alguns itens com as principais conclusões de estudos que fornecerão um melhor entendimento da pesquisa que foi desenvolvida neste trabalho. Primeiramente, está apresentada uma introdução do que é uma estaca geotérmica e o desafio que a variação térmica pode trazer em sua utilização. Três itens abordam os principais assuntos quanto ao comportamento geomecânico advindo da variação térmica, que são:

- os reflexos da distribuição de deformações e tensões termicamente induzidas;
- a formação de um ponto de deslocamento absoluto nulo, que é a principal particularidade quanto ao comportamento das estacas geotérmicas;
- e a influência da alteração de temperatura no comportamento do solo.

Além disso, estão apresentados os principais modelos de transferência de carga, que visam prever o comportamento geomecânico de estacas geotérmicas. Também está apresentado um item que traz uma possível utilização do carregamento térmico na elaboração de curvas carga-recalque semelhante às curvas obtidas em provas de cargas.

Por fim, informações sobre ensaios anteriores na estaca geotérmica utilizada nesta pesquisa estão apresentadas.

### **2.1 - Estacas Geotérmicas**

Estacas geotérmicas são elementos de fundações confeccionados com tubulações trocadoras de calor em seu interior, conforme Figura 2, para serem utilizadas na produção de energia geotérmica renovável. Elas fazem parte de sistemas que utilizam o potencial geotérmico do solo para aquecimento ou resfriamento de ambientes. Fundações confeccionadas com esse propósito podem ser pré-fabricadas ou moldadas *in loco*.

Segundo Brandl (2006), o uso das fundações como elemento trocador de calor é uma inovação que faz uso da alta capacidade de armazenamento térmico dos elementos de concreto já necessários por motivos estruturais e não precisam ser instalados elementos adicionais, como os sistemas convencionais de utilização de energia térmica. Este método além de inovador é significativamente mais econômico do que os sistemas convencionais, e sustentável porque usa energia limpa e renovável.

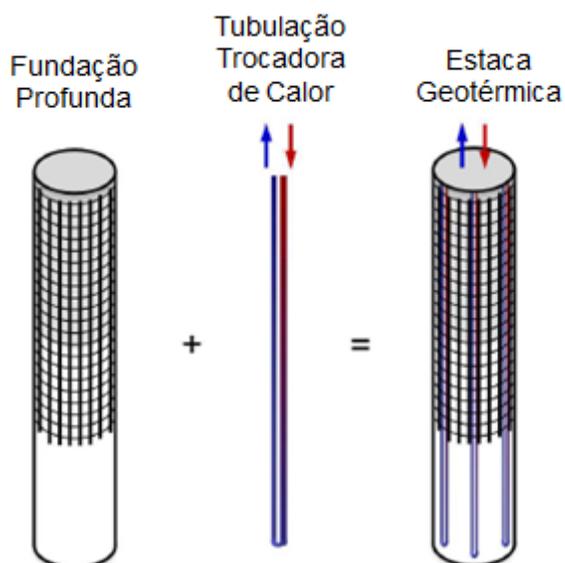


Figura 2 – Esquema representativo dos elementos de uma estaca geotérmica (Sutman, 2016).

A tubulação trocadora de calor empregada no interior da estaca geotérmica pode ser colocada com diferentes configurações dependendo da finalidade e eficiência esperada. A Figura 3 de Hamada *et al.* (2007), por exemplo, mostra 4 tipos de configurações de arranjo no interior da estaca geotérmicas.

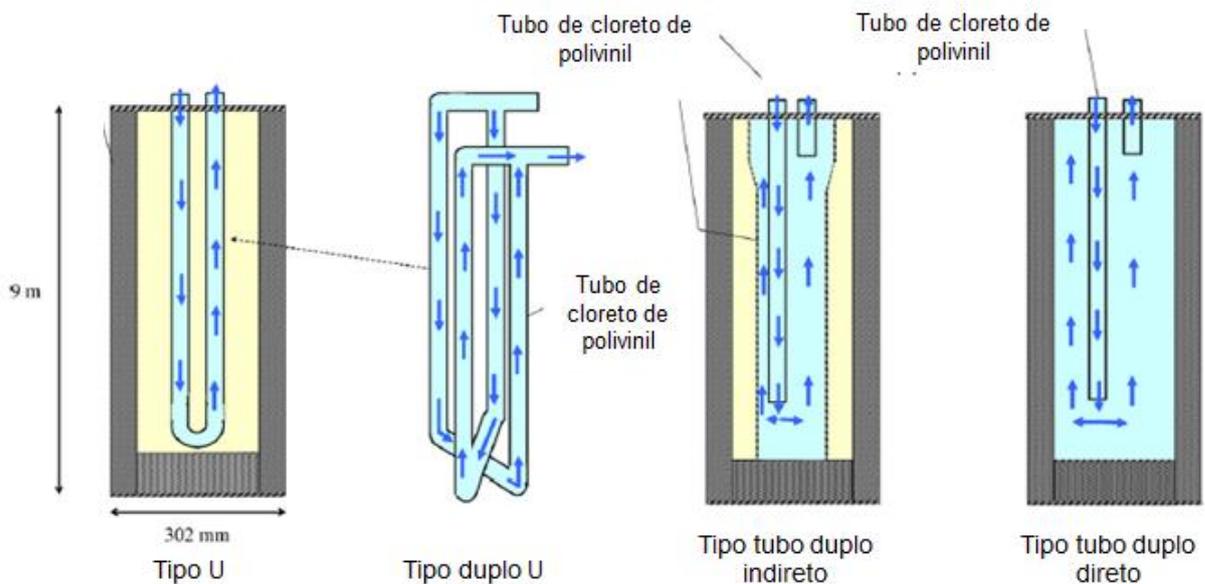


Figura 3 - Arranjos de tubulação trocadora de calor no interior das estacas geotérmicas (Hamada et al. 2007).

Por serem utilizadas com duplo propósito, o emprego de estacas geotérmicas vem demandando estudos quanto aos efeitos térmicos no comportamento mecânico da estaca e do solo. Enquanto o conhecimento sobre seu comportamento como elemento estrutural é bem difundido, o conhecimento sobre seu comportamento quando submetida a variações de temperatura é ainda limitado e leva a aproximações nos projetos de tais estruturas.

De acordo com Amatya et al. (2012), durante os ciclos de aquecimento e resfriamento, as estacas geotérmicas se expandem e se contraem, e isso altera a interação solo-estaca. Em alguns casos, isso pode resultar em consequências indesejadas nas edificações, como recalques adicionais, tensões axiais de tração nas fundações, grandes esforços axiais de compressão ou mobilização de resistência lateral limite.

## 2.2 - Deformações e Tensões Termicamente Induzidas

Quando uma estaca geotérmica é submetida à variação de temperatura, ocorre o surgimento de deformações termicamente induzidas. Se a estaca estiver livre para se expandir ou contrair sob o carregamento térmico, ou seja, sem

restrições laterais ou nas pontas, a deformação é puramente elástica e dependerá apenas do coeficiente de expansão da estaca ( $\alpha_c$ ) e variação de temperatura ( $\Delta T$ ), podendo ser facilmente calculada pela Equação 2.2.1:

$$\varepsilon_{T,livre} = -\alpha_c \Delta T \quad (2.2.1)$$

As deformações termicamente induzidas nas estacas geotérmicas, no entanto, não podem ser analisadas pela Equação 2.2.1, uma vez que estando a estaca embutida no solo, deve-se analisar o conjunto solo-estaca. Evidentemente, o comportamento e a distribuição das deformações do conjunto solo-estaca será diferente da condição livre, e a magnitude da deformação observada ( $\varepsilon_{T,obs}$ ) será menor que a livre ( $\varepsilon_{T,livre}$ ).

Pela diferença entre a deformação térmica observada ( $\varepsilon_{T,obs}$ ) e a deformação térmica livre ( $\varepsilon_{T,livre}$ ) é possível obter-se a tensão adicional gerada devido ao carregamento térmico. Sendo  $E$  o módulo de elasticidade do concreto armado, a tensão termicamente induzida ( $\sigma_T$ ) é calculada pela Equação 2.2.2:

$$\sigma_T = E(\varepsilon_{T,obs} - \varepsilon_{T,livre}) \quad (2.2.2)$$

Uma vez obtida a tensão termicamente induzida ( $\sigma_T$ ), pode-se calcular também a carga axial termicamente induzida ( $P_T$ ) pela Equação 2.2.3:

$$P_T = A\sigma_T \quad (2.2.3)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal da estaca.

A razão entre a deformação térmica observada ( $\varepsilon_{T,obs}$ ) e a deformação térmica livre ( $\varepsilon_{T,livre}$ ) é o grau de liberdade ( $n$ ), que é um parâmetro alternativo de análise utilizado por Knellwolf *et al.* (2011).

$$n = \frac{\varepsilon_{T,obs}}{\varepsilon_{T,livre}} \quad (2.2.4)$$

É importante ressaltar que o carregamento térmico é distribuído uniformemente ao longo da estaca geotérmica. Isso ocorre, pois como o sistema trocador de calor está presente ao longo de todo o eixo da estaca, a variação de temperatura tende a ser igualmente imposta ao longo da estaca. Diferentemente, o carregamento mecânico é aplicado na cabeça da estaca e gera deformações e

tensões maiores no topo da estaca que diminuem com a profundidade pela atuação da resistência lateral até chegar à ponta, que normalmente não é significativamente mobilizada.

De acordo com Laloui *et al.* (2006), o solo circundante afeta a distribuição das deformações térmicas na estaca. A carga axial adicional induzida termicamente na estaca pode ser relativamente grande, no ensaio experimental discutido pelo autor a carga axial foi da ordem de 100 kN/°C numa estaca de 25,8 m de comprimento e 88 cm de diâmetro. Na ponta inferior, os efeitos térmicos produzem tensões axiais muito maiores do que as criadas pelo carregamento mecânico devido à natureza uniforme dos efeitos térmicos, conforme observado na Figura 4 onde a variação de temperatura é  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ .

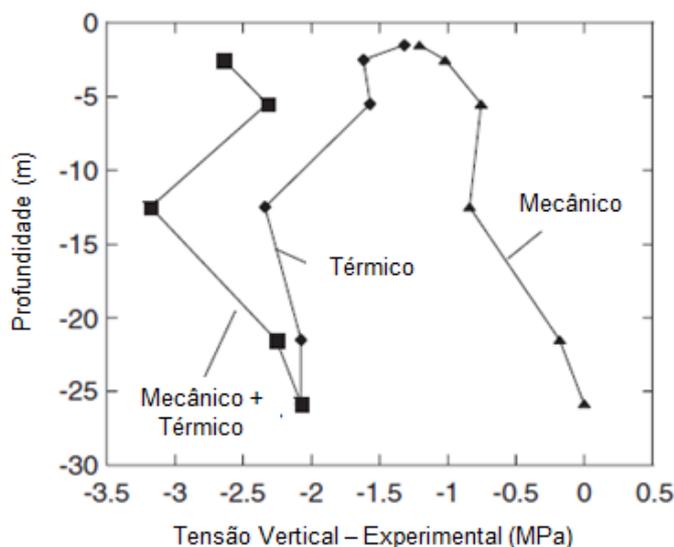


Figura 4 - Distribuição das tensões ao longo da sob carregamento mecânico, térmico e térmico juntamente com mecânico (Laloui *et al.*, 2006).

Para Bourne-Webb *et al.* (2009), a distribuição de carga axial na estaca em resposta ao aquecimento ou resfriamento dependerá do grau de liberdade devido a estrutura sobre a fundação bem como aos materiais empregados na sua confecção.

Segundo Amatya *et al.* (2012), o comportamento termomecânico da estaca geotérmica é influenciado pela rigidez do solo circundante (resistência), a resistência de ponta e a magnitude do carregamento aplicado sobre a fundação. Se ambas as extremidades são livres para se mover, conforme Figura 5, e assumindo que o atrito lateral é constante com a profundidade, a deformação mínima observada estará na metade do comprimento da estaca e a deformação máxima estará nas pontas. O

valor da deformação axial deverá reduzir com o aumento da resistência da interface solo-estaca e depende de vários fatores, incluindo o tipo e a rigidez do solo bem como a magnitude do carregamento térmico. Tal restrição proporcionada na interface solo-estaca resultará na carga axial induzida termicamente, que é compressiva quando a estaca é aquecida. Se qualquer restrição for imposta nas extremidades da estaca, conforme Figura 6, as deformações serão restritas e a carga compressiva adicional será desenvolvida. A tensão resultante e, portanto, o perfil de carregamento variará, dependendo da rigidez das restrições nas pontas.

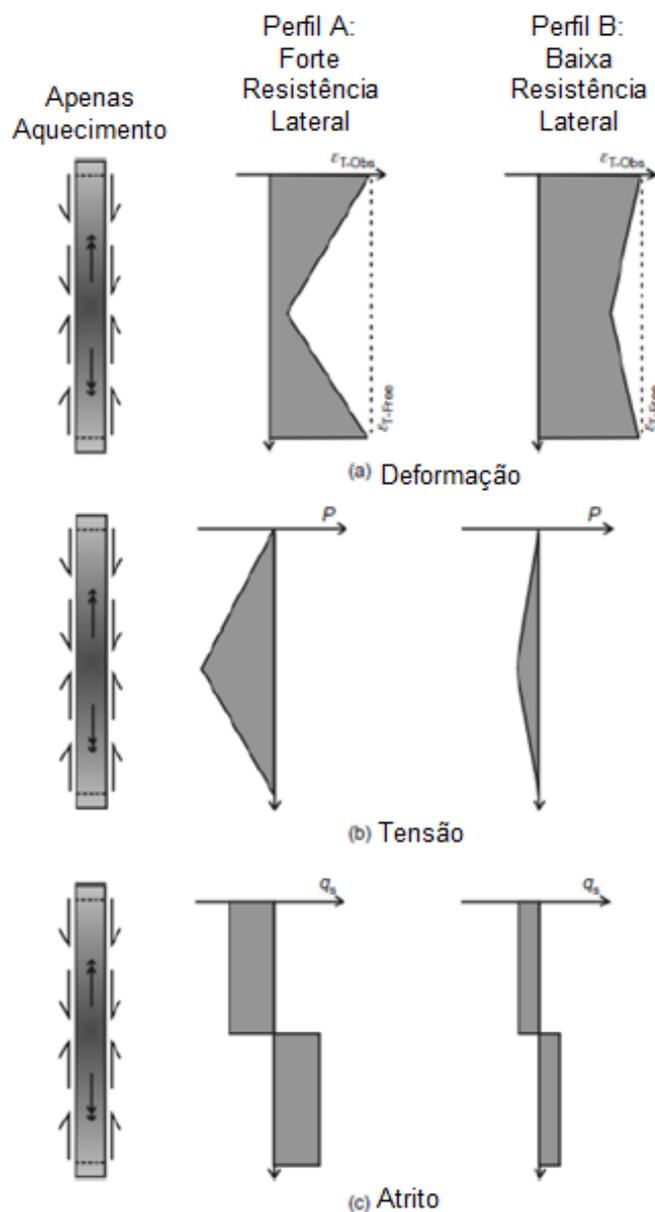


Figura 5 - Efeito do carregamento térmico e do solo no comportamento de uma estaca submetida ao aquecimento e sem restrições em suas extremidades. (a) Perfis de deformação axial térmica; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya et al., 2012).

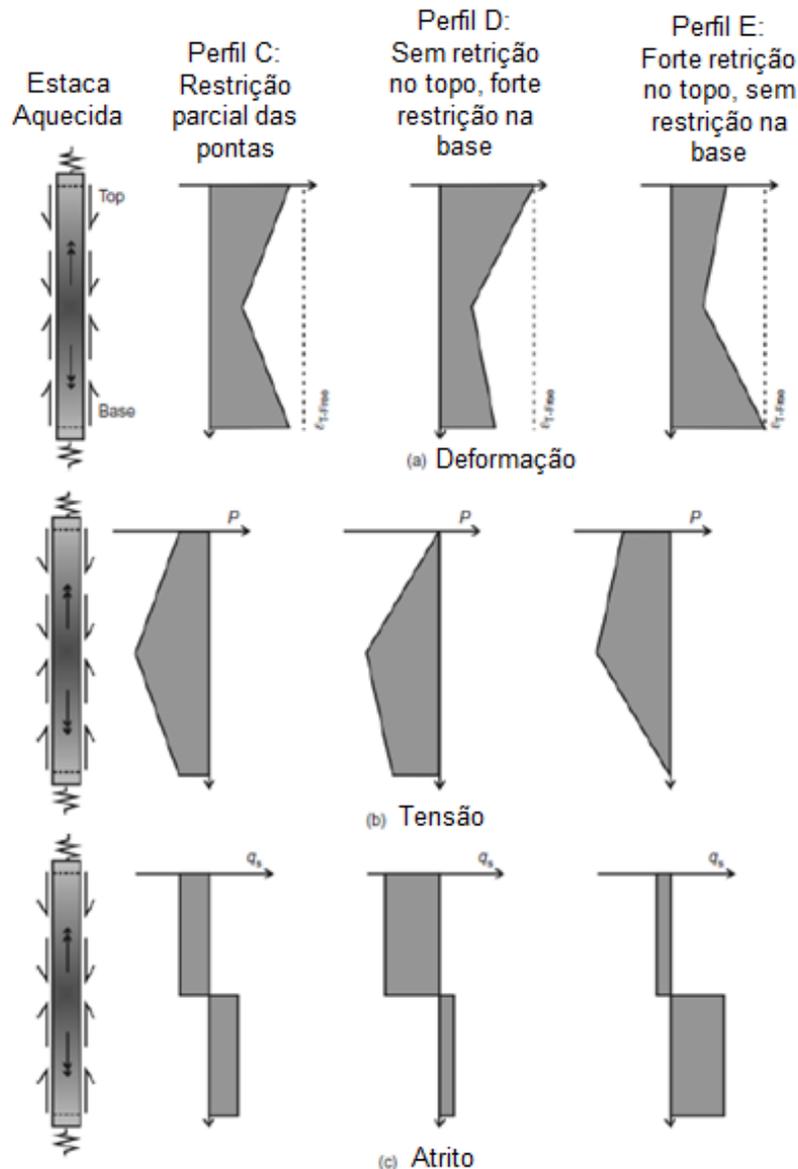


Figura 6 - Efeito do carregamento térmico e do solo no comportamento de uma estaca durante o aquecimento com imposição de restrição nas extremidades. (a) Perfis de deformação axial; (b) Perfis de tensão axial; (c) Perfis de atrito lateral mobilizado termicamente. (Amatya et al., 2012).

De acordo com Bourne-Webb *et al.* (2013), à medida que a resistência e a rigidez do solo aumentam, a restrição mobilizada na interface solo-estaca aumentará. Durante o aquecimento, as tensões compressivas na profundidade média da estaca terão maior proporção do que nas extremidades. A carga axial compressiva que se desenvolve e a resistência lateral mobilizada serão maiores em um perfil de solo mais rígido. Durante o aquecimento, assim que qualquer restrição for imposta nas extremidades da estaca, a expansão será restrita e maior tensão compressiva será gerada. Como a deformação axial é restringida, a resistência

lateral mobilizada em um determinado solo será menor que no caso da estaca sem restrição nas extremidades. À medida que as rigidezes das restrições nas extremidades aumentam, a resistência lateral mobilizada diminuirá.

Além da influência das características geotécnicas do solo e condições de carregamento mecânico, de acordo com Banerjee *et al.* (2018), a distribuição das deformações termicamente induzidas também é influenciada pelo coeficiente de expansão térmica do solo.

### **2.3 - Ponto Nulo**

Como explicado no item anterior, o carregamento térmico resultará no surgimento de deformações e tensões ao longo do eixo axial da estaca. A distribuição das deformações dependerá das características do solo circundante e das restrições nas pontas da estaca.

Caso a estaca estivesse livre (sem restrições), ao ser submetida a um carregamento térmico as deformações seriam constantes ao longo da estaca. Exatamente no ponto médio do seu comprimento haveria o surgimento de um ponto dividindo a estaca em relação ao seu deslocamento. Isso significa que, uma metade da estaca irá se deslocar para uma extremidade enquanto a outra extremidade irá se deslocar para o lado oposto, com a mesma magnitude de deslocamento.

O ponto que divide a estaca em relação ao seu deslocamento é conhecido como ponto nulo. Esse é o ponto axial mais restrito na estaca, ou seja, é o ponto com deslocamento absoluto nulo. O surgimento do ponto nulo em estacas geotérmicas embutidas no solo foi comentada por Bourne-Webb *et al.* (2009). De acordo com o autor, a estaca se expande e se contrai em relação a um ponto nulo. Em outras palavras, o aquecimento da estaca resulta em deslocamento relativo ascendente acima do ponto nulo e deslocamento descendente abaixo do ponto nulo. A direção oposta de movimento da estaca ocorre no resfriamento. Na Figura 7 de Bourne-Webb *et al.* (2013) é possível perceber a localização do ponto nulo nos gráficos de carga axial mobilizada e resistência lateral mobilizada numa estaca

geotérmica de 23 m de comprimento embutida no *campus* da *Lambeth College* em Londres.

Note na Figura 7 que a localização do ponto nulo em estacas geotérmicas embutidas no solo poderá, no entanto, ser em cota diferente do ponto médio da estaca. Isso ocorre, pois as deformações termicamente induzidas são influenciadas pelo solo circundante e as condições de restrições das pontas, como visto no item anterior. Assim, maciços que apresentam camadas de solos diferentes e existência de resistência de ponta já serão suficientes para que haja uma movimentação na localização do ponto nulo.

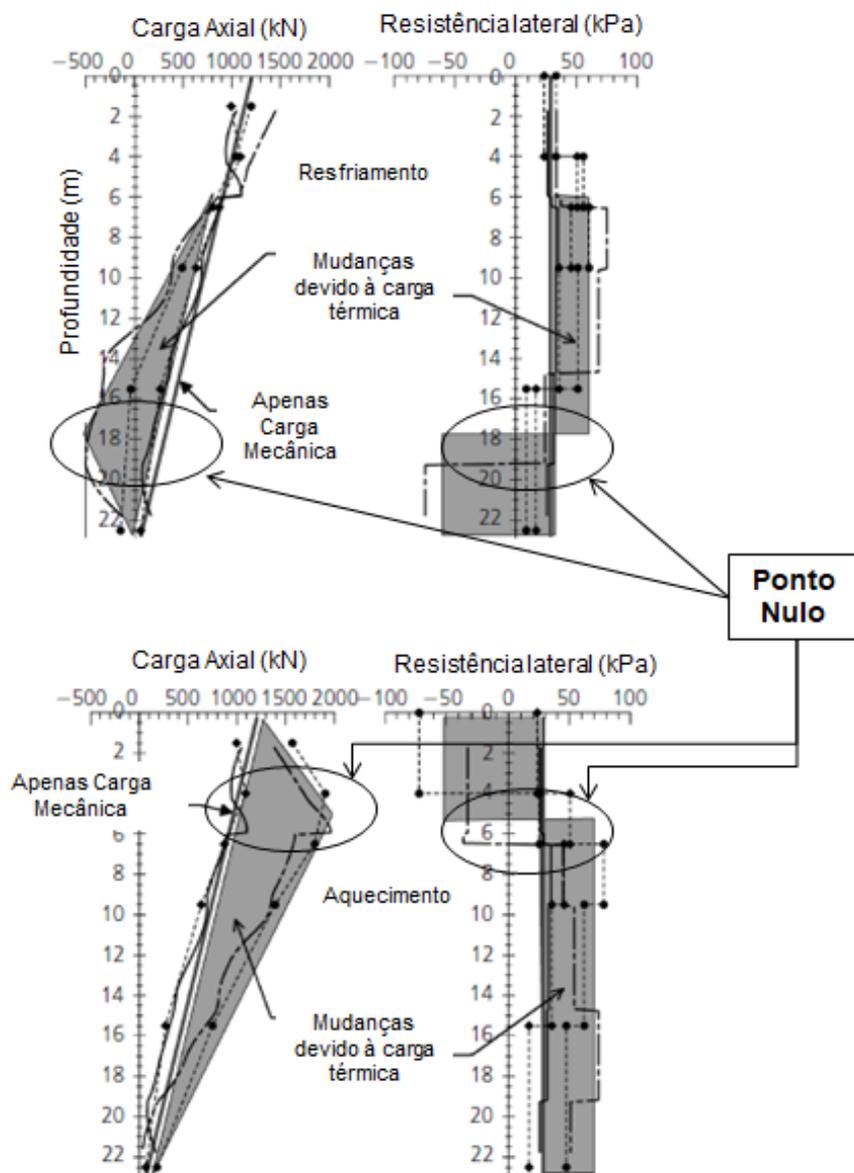


Figura 7 - Mudanças induzidas termicamente na tensão axial e associadas ao atrito lateral mobilizado entre o solo e a estaca. (Bourne-Webb et al., 2013).

Estudos mais recentes como Rotta Loria *et al.* (2015), por exemplo, comentam sobre a importância de uma previsão da localização do ponto nulo em estacas geotérmicas. É importante que haja uma estimativa do comportamento do ponto nulo para que se possa aplicar essa estimativa aos projetos de estacas geotérmicas, nas simulações numéricas e nos modelos de transferência de carga como, por exemplo, a de Chen e McCartney (2016).

Essa diferença de localização do ponto nulo dependente das condições de restrições da estaca pode ser explicada pela afirmação de Knellwolf *et al.* (2011), que explica que a soma das forças mobilizadas na seção acima do ponto nulo deve ser igual a soma das forças mobilizadas na seção inferior ao ponto nulo, para que se tenha deslocamento absoluto zero no ponto nulo. Além disso, a afirmação de Laloui e Di Donna (2011), de que as deformações induzidas termicamente na estaca são resultado do equilíbrio entre as tensões termicamente induzidas e a mobilização de resistência do solo, também ajuda a esclarecer a diferença de localização do ponto nulo de uma estaca circundada por maciço de fundação em relação ao caso da estaca livre.

De acordo com Mimouni e Laloui (2013), a localização do ponto nulo permanece estacionária durante variação de temperatura. Tal afirmação leva a conclusão de que durante todo o carregamento térmico, ainda que haja variação de temperatura, o ponto permanecerá numa dada localização dependendo das características do solo circundante e das restrições nas pontas da estaca. No entanto, Rotta Loria *et al.* (2015) afirma que durante o carregamento térmico, havendo variação de temperatura, haverá também variação do ponto nulo. Segundo o autor, isso é devido a uma reorganização das tensões mobilizadas da resistência de ponta, resistência lateral e interação entre as partículas do solo na interface solo-estaca.

É importante ressaltar que pouco se discute em relação à posição do ponto nulo ser estacionário ou não. Em outras palavras, não há consenso majoritário sobre a condição estacionária do ponto nulo em estacas sem restrição de topo. Provavelmente porque, normalmente, as estacas possuem o topo com maior grau de restrição, gerando ali o ponto nulo.

## 2.4 - Influência da Temperatura no Comportamento do Solo

Como visto no item anterior, a variação de temperatura da estaca térmica ocasionará uma reorganização das tensões e interação das partículas do solo. Assim, a análise do comportamento do solo quando submetido a variações de temperatura torna-se necessária para melhor entendimento do comportamento das estacas geotérmicas quando submetidas a carregamentos cíclicos ou fases de carregamento e descarregamento térmico. A perturbação imposta pela temperatura e sua magnitude dependerá das propriedades térmicas do concreto, das características geotécnicas e geotérmicas do solo. Então, precisa ser feito o estudo das modificações de tensões e deformações nos solos impostas pelo carregamento térmico. Isso decorre da necessidade de uma avaliação se a variação de temperatura poderá resultar em mudança no estado de tensão na interface solo-estaca e na mudança da resistência do solo.

Os principais processos termomecânicos que afetam o comportamento dos solos são o endurecimento térmico, o fluxo de água induzido, o excesso de poropressão desenvolvido e a mudança de volume devido ao adensamento térmico, sendo o último possivelmente o mais crítico (Loveridge *et al.*, 2017 e Olgun *et al.* 2014). Ainda, Sutman *et al.* (2015) afirmam que a variação de temperatura nas argilas pode afetar algumas propriedades do solo tais como grau de pré-adensamento, resistência ao cisalhamento e capacidade de geração de excesso de poropressão, além de deformação volumétrica.

No estudo da influência da temperatura no comportamento dos solos, os arenosos com maior granulometria não são de grande importância, segundo Hueckel *et al.* (2009). De acordo com o autor, estes não demonstram ser afetados pela variação de temperatura devido sua alta permeabilidade. Diferentemente, estudos demonstram que solos finos costumam sofrer densificação e uma redução na resistência ao cisalhamento devido sua baixa permeabilidade, pois com o aumento relativamente rápido da temperatura a poropressão aumenta, resultando numa redução da tensão efetiva no curto prazo.

Dentre as perturbações impostas pelo carregamento térmico, a geração de poropressão exige alguma atenção. De acordo com Sutman (2016) um excesso de

poropressão de 0,7% da tensão efetiva é gerado pelo aumento de 1°C na temperatura do solo, podendo ser maior no caso de argila normalmente adensada. Além disso, os estudos de Campanella *et al.* (1968) e Boudali *et al.* (1994) afirmam que a mudança de temperatura no solo resulta em mudança de volume do solo com consequente aumento ou diminuição da poropressão e alteração da estrutura do solo, modificando a resistência de contato entre as partículas do solo.

Assim, conforme citado no parágrafo anterior, a elevação da temperatura pode resultar numa diminuição da tensão efetiva em períodos curtos. Contudo, em se tratando de períodos longos, o efeito da variação de temperatura na deformação volumétrica não depende apenas da história de variação da temperatura, mas também do grau de pré-adensamento.

Em se tratando de comportamento em períodos longos, o grau de pré-adensamento das argilas diferencia o seu comportamento. Argilas normalmente adensadas diminuem o índice de vazios quando submetidas à variação térmica enquanto que argilas fortemente pré-adensadas costumam aumentar o índice de vazios. A Figura 8 adaptada de Cekerevac e Laloui (2004) demonstra tal comportamento em amostras de “*Kaolin clay*” numa variação de temperatura de 20 °C a 90 °C com diferentes graus de pré-adensamento. Nota-se que as amostras normalmente adensadas ou com baixo grau de pré-adensamento diminuem de volume com o aumento da temperatura e, a medida que o grau de pré adensamento aumenta há tendência de aumento de volume com o aumento da temperatura.

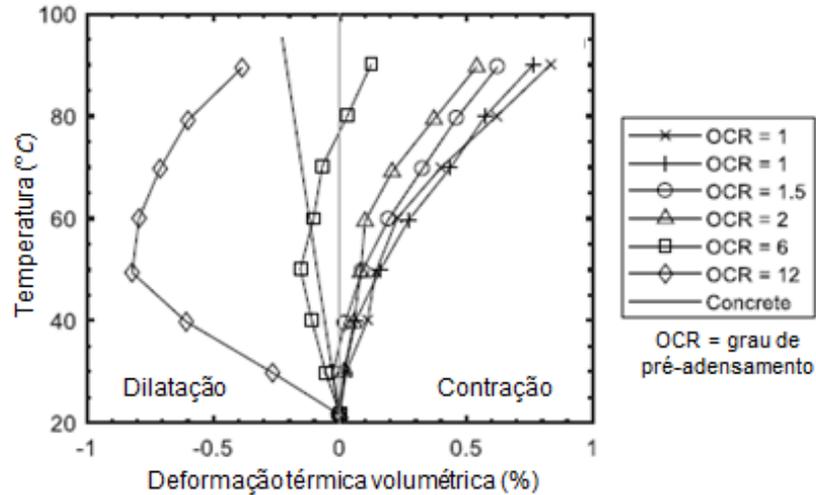


Figura 8 - Aquecimento de amostras de "Kaolin clay" com diferentes graus de pré-adensamento. (adaptada de Cekerevac e Laloui, 2004).

Outro importante aspecto em relação ao grau de pré-adensamento pode ser notado na Figura 9 de Laloui e François (2009). Na Figura 9, as linhas foram geradas a partir da simulação numérica de ciclos de aquecimento-resfriamento de diferentes graus de pré-adensamento e os pontos são de resultados de estudos experimentais. É possível notar analisando o gráfico, que argilas normalmente adensadas demonstram um comportamento irreversível na mudança de volume enquanto que argilas fortemente pré-adensadas demonstram comportamento reversível (elástico).

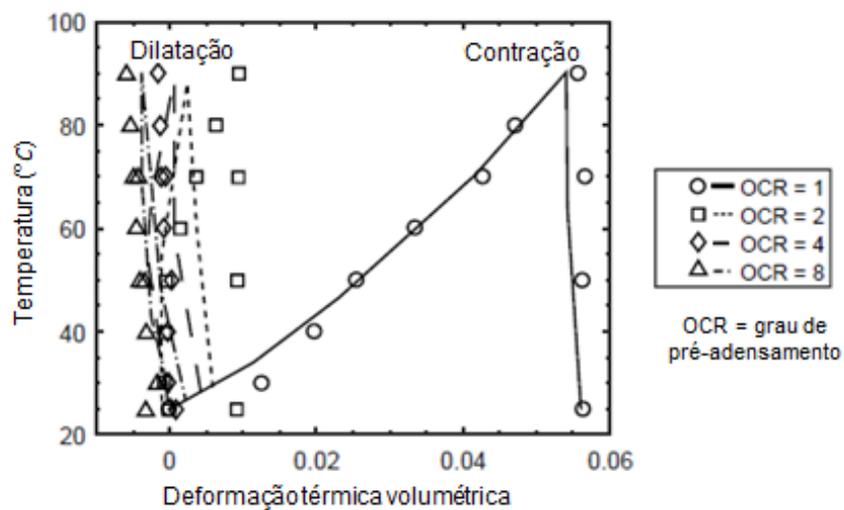


Figura 9 - Comparativo experimental e numérico de ciclos de aquecimento-resfriamento em argilas com diferentes graus de pré-adensamento. (Laloui e François, 2009).

Assim, como as argilas normalmente adensadas exibem um comportamento de contração irreversível, Sutman (2016) ressalta que, em se tratando de projeto de estacas geotérmicas argilas normalmente adensadas poderão gerar atrito negativo na estaca, resultado do recalque adicional.

A presença de argila mole normalmente adensada é, segundo Loveridge *et al.* (2017), outro aspecto que demanda atenção nos projetos de estacas geotérmicas devido a sua possível alta deformação plástica volumétrica quando aquecida. No entanto, depois de densificada pela mudança de volume, ciclos seguintes de mesma variação de temperatura apresentarão comportamento elástico.

## 2.5 - Modelos de Transferência de Carga

Com o objetivo de prever e analisar o comportamento das estacas geotérmicas, Knewllwof *et al.* (2011), Plaseied (2012), Suryatriyastuti *et al.* (2014) e Chen e McCartney (2016) propuseram alguns métodos simplificados de análise de transferência de carga.

Dentre os modelos citados acima, Knewllwof *et al.* (2011) foi pioneiro na aplicação de métodos de diferenças finitas em estacas geotérmicas pela discretização em elementos. A Figura 10 mostra esquematicamente o modelo proposto pelo autor. Na Figura 10a é apresentado um esquema discretizado em  $n$  elementos com aplicação de carga mecânica no topo, onde  $z_i$  são os deslocamentos de cada elemento. O esquema 10b mostra as forças externas ( $T_{mec}$ ) mobilizadas na aplicação da carga mecânica para cada elemento discretizado. O esquema 10c apresenta a discretização do modelo na aplicação de um carregamento térmico, onde  $z_i$  são os deslocamentos de cada elemento. Por fim, o esquema 10d mostra as forças externas ( $T_{th}$ ) mobilizadas na aplicação da carga térmica. Note que entre os esquemas de carga mecânica e térmica existem diferenças nas direções dos vetores dos deslocamentos e forças externas mobilizadas.

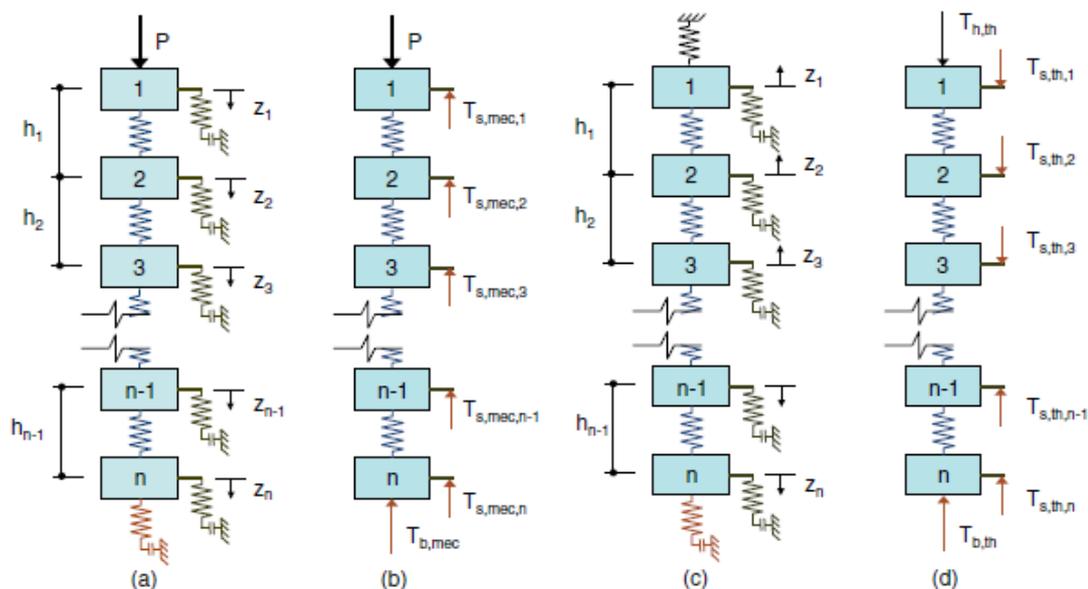


Figura 10 - Discretização de Knewllwof et al. (2011) para análise em diferenças finitas. (a) deslocamentos por carga mecânica; (b) forças externas para carga mecânica; (c) deslocamentos para carga térmica; (d) forças externas para carga térmica.

O método proposto por Chen e McCartney (2016) é feito pela combinação da capacidade última de ponta e lateral com uma curva conhecida da resistência mobilizada pelo carregamento térmico. O método é simples e necessita de poucos parâmetros para a análise, e é uma alternativa para o uso da estimativa das tensões, deformações e deslocamentos mobilizados.

Para que seja considerada a deformação termo-elástica e possível deformação termo-elastoplástica da fundação, este método utiliza a análise de transferência de carga desenvolvida por Coyle e Reese (1966), que originalmente é utilizada na previsão de recalque e distribuição de tensão de fundações profundas submetidas a carregamento mecânico.

Para o uso deste método, o módulo de elasticidade ( $E$ ) e o coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha_c$ ) da estaca são considerados constantes, e a localização do ponto nulo é crucial na discretização da estaca geotérmica para a análise do movimento ascendente ou descendente. Além disso, este método pode considerar a resistência lateral do solo constante (método alpha) ou com resistência lateral crescente com a profundidade (método beta). Figura 11 mostra esquematicamente a discretização segundo Chen e McCartney (2016) enfatizando a importância do ponto nulo para correta análise dos deslocamentos no aquecimento da estaca.

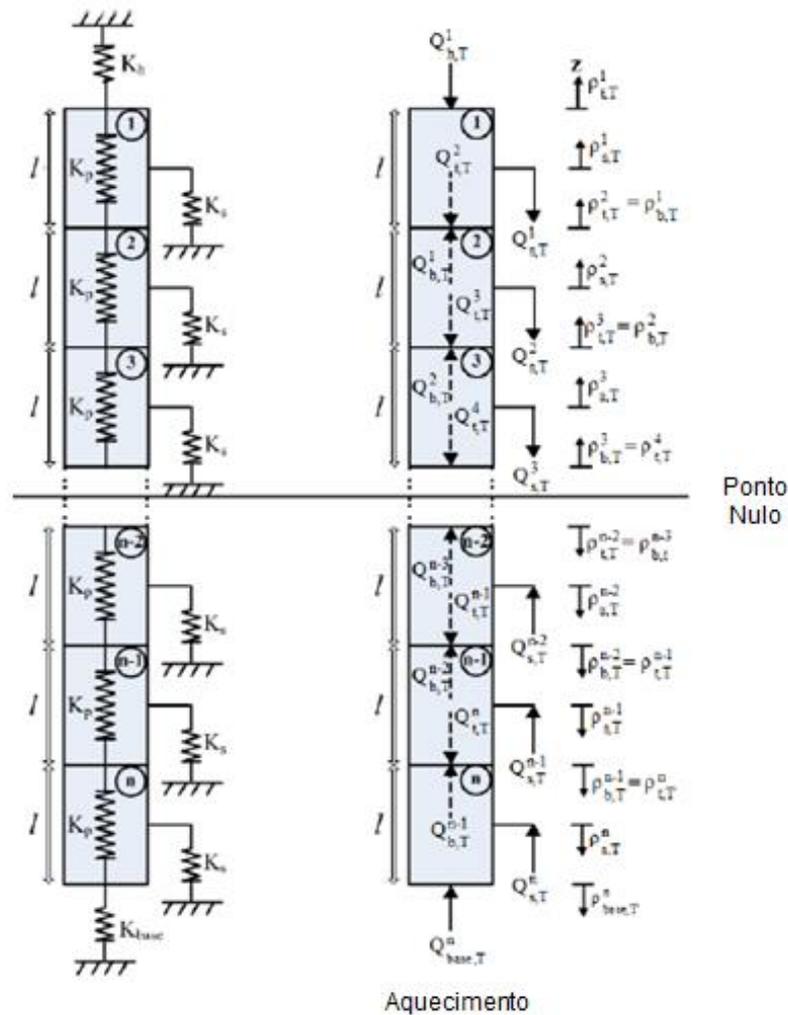


Figura 11 - Discretização para análise em diferenças finitas segundo Chen e McCartney (2016).

As principais análises propostas na literatura estão fundamentadas nos trabalhos de Knellwolf *et al.* (2011), Plaiseied (2012), Suryatriyastuti *et al.* (2014) e Chen e McCartney (2016). Esses trabalhos apresentam formulações de transferências de carga na interface solo-estaca considerando parâmetros como resistência lateral e de ponta da estaca, rigidez lateral e de ponta do solo, deslocamento lateral da estaca, expansão radial e variação de temperatura.

Cabe ressaltar que os métodos citados acima não consideram alteração na interação solo-estaca devido à variação de temperatura e são basicamente aplicados considerando carregamento térmico monotônico, com exceção de Suryatriyastuti *et al.* (2014). Este por sua vez propõe um método mais elaborado considerando carregamentos cíclicos com os parâmetros  $\rho$  e  $\xi$ , que são parâmetros

que permitem controlar o comportamento de fadiga na interface solo-estaca, conforme Figura 12.

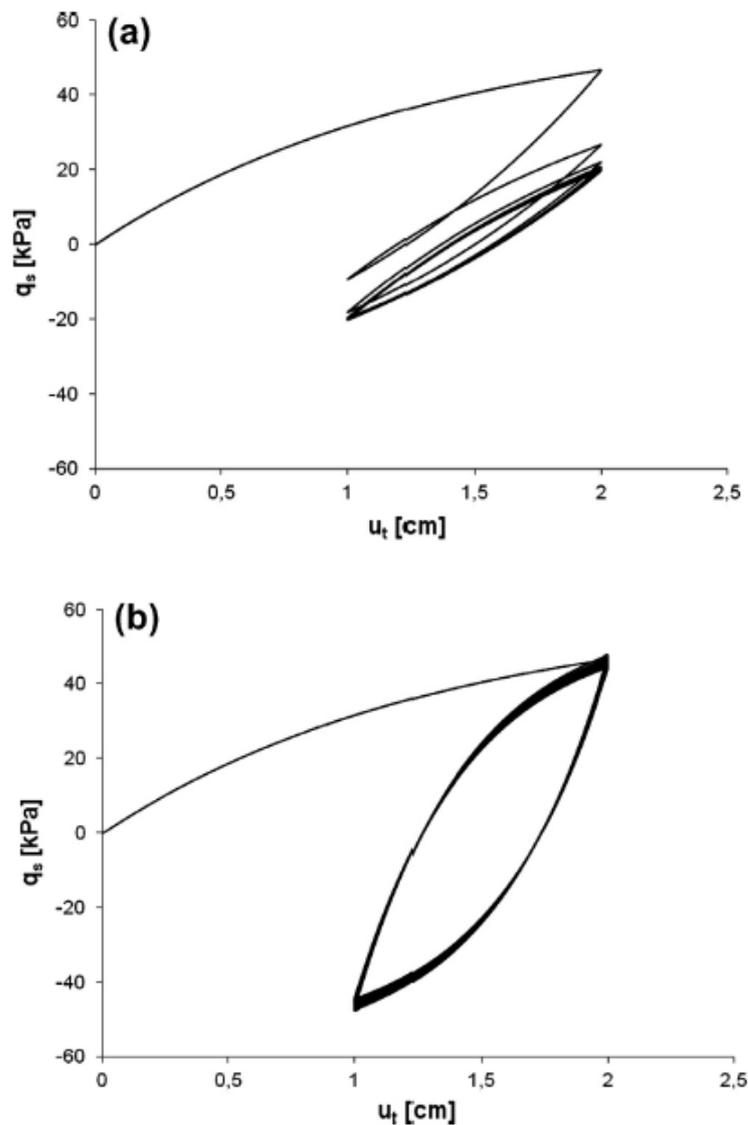


Figura 12 – Curva carga deslocamento: (a) com fadiga na interface para  $\rho$  e  $\xi$  igual a 1; (b) sem fadiga quando  $\rho$  e  $\xi$  igual a 3. (Suryatriyastuti et al. 2014).

Nesta pesquisa foi utilizada a análise proposta por Chen e McCartney (2016) que utiliza curva t-z constante ao longo da estaca. A curva t-z utilizada nessa análise foi formulada pela aproximação hiperbólica da curva de Reese e O’Neil (1987). Cabe ressaltar que a análise proposta nesse trabalho dirige-se a solos uniformes e não plástico. No item 3.4 do capítulo 3 está apresentado detalhadamente o método utilizado.

## 2.6 - Prova de Carga

Mediante análise de resultados anteriores de carregamento térmico em estacas percebe-se a similaridade dos resultados com os resultados de provas de carga aplicados às fundações para avaliação das cargas admissíveis.

De acordo com Da Silva (1983), é incontestável que o ensaio de carga direto no elemento de fundação permite estimar com maior confiança a capacidade de carga.

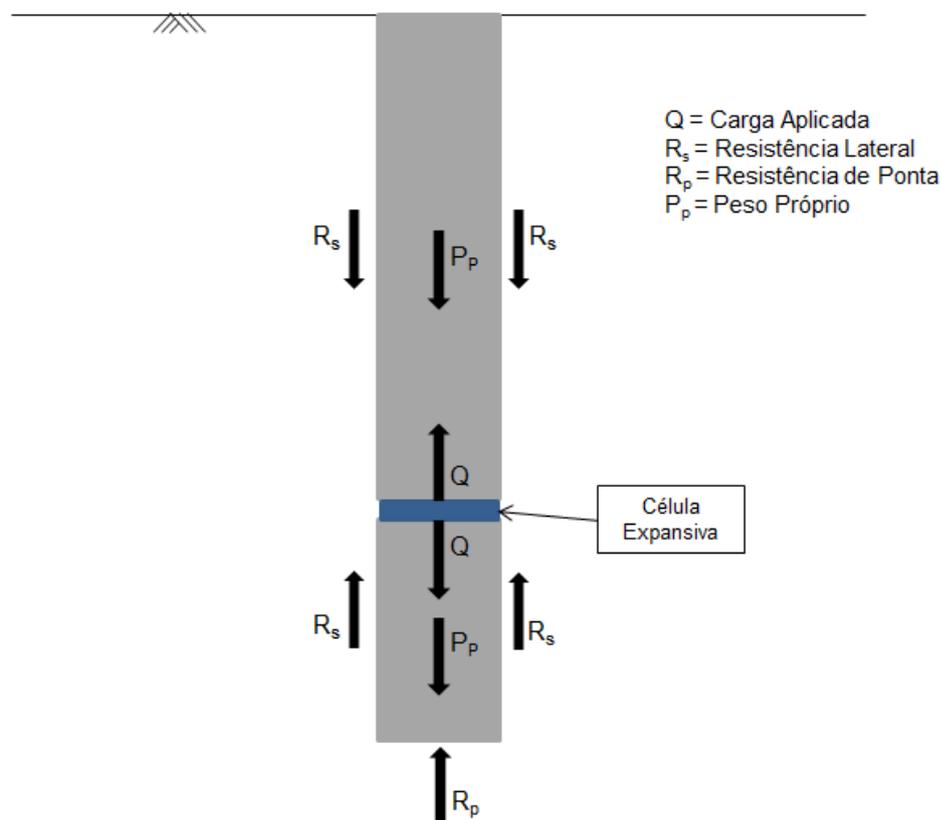


Figura 13 - Sistema de reações pelo método bidirecional.

Como visto anteriormente, ao serem submetidas ao aquecimento as estacas geotérmicas embutidas no solo se expandem em relação a um ponto nulo, sendo esse o ponto de equilíbrio entre as forças mobilizadas acima e abaixo do ponto. Quando a estaca geotérmica não apresenta restrição de topo, tal definição nos remete ao ensaio de prova de carga bidirecional. De acordo com Souza Cruz *et al.* (2015), o método bidirecional de prova de carga baseia-se na aplicação de um carregamento, por meio de uma célula expansiva, no ponto estimado de equilíbrio

das tensões da estaca. Em outras palavras, estima-se a resistência lateral e de ponta da estaca e, no ponto de equilíbrio de forças entre a resistência para um deslocamento ascendente e um descendente coloca-se uma célula expansiva que aplicará a mesma força nas duas direções. A Figura 13 apresenta esquematicamente o sistema de reações do método bidirecional. Os deslocamentos são medidos tanto para o deslocamento ascendente quanto para o deslocamento descendente e uma curva carga-deslocamento pode ser obtida, conforme Figura 14.

De acordo com Da Silva (1986), depois de obtida a curva da Figura 14 para se converter numa única curva carga-recalque, verifica-se na curva carga-deslocamento qual carga equivale no deslocamento ascendente e descendente a um recalque de certo valor. Os valores equivalentes de carga para o recalque adotado são somados e atribuídos a esse e uma curva ajustada é obtida, conforme Figura 15.

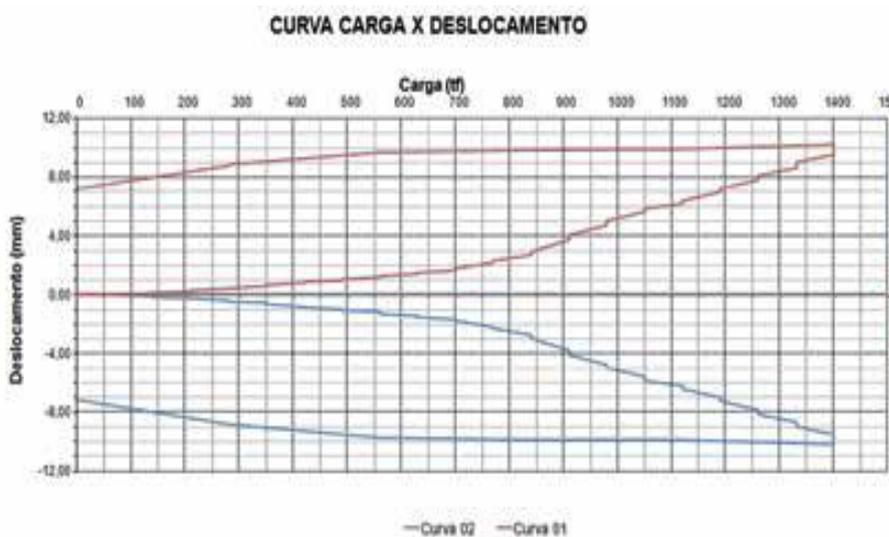


Figura 14 - Curva carga x deslocamento de topo e base - Ensaio Bidirecional. (Souza Cruz et al. 2015).

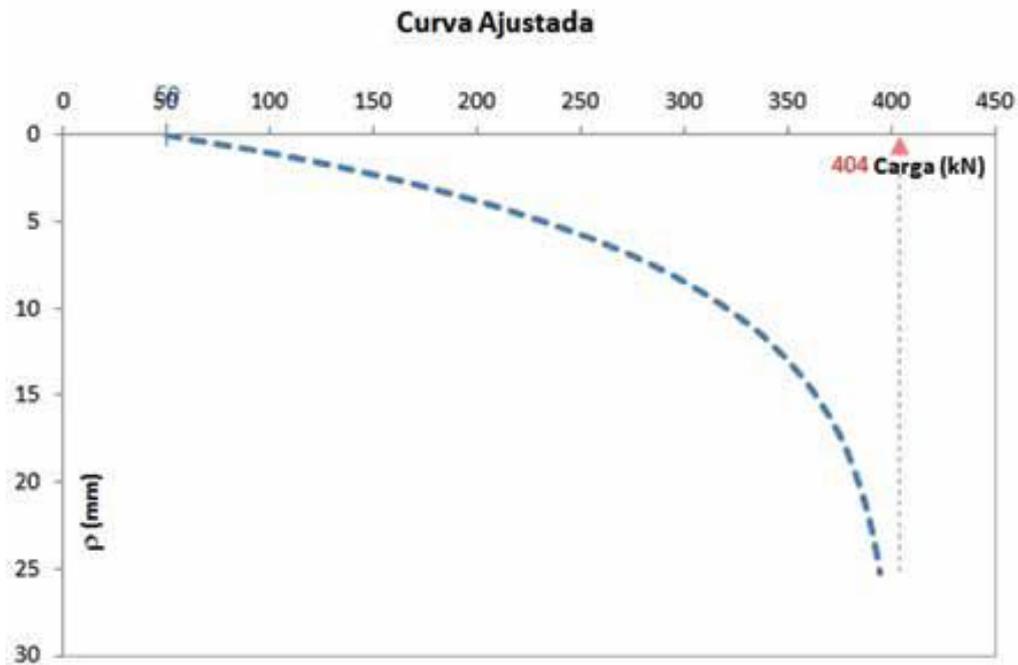


Figura 15 - Curva carga x recalque ajustada do ensaio bidirecional. (Souza Cruz et al. 2015).

Assim, o ensaio de carga pela aplicação de carregamento térmico pode surgir como uma opção mais simples e menos onerosa. Além da prova de carga pelo método bidirecional citado acima, outros tipos são comumente utilizados. Por exemplo, as provas de carga estáticas que utilizam algum sistema de reação (como por exemplo, cargueiras ou reação com as estacas vizinhas) para gerar deslocamentos na fundação. Essas provas de carga costumam ser simples, no entanto, onerosas e com necessidade de maior espaço para montagem do sistema. Outro tipo comum, por exemplo, é a prova de carga dinâmica, que consiste na aplicação de ciclos de carga e descarga para um mesmo deslocamento axial com energias crescentes.

## 2.7 - Histórico de ensaios em estacas geotérmicas no Brasil

No Brasil, a Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) possui um campo experimental onde tem realizado estudos sobre estacas geotérmicas. As características da estaca geotérmica estão apresentadas no item 3.1 do capítulo 3. Utilizando uma estaca geotérmica embutida no *campus* da UENF, Ferreira (2017)

realizou dois ensaios com objetivo de se discutir a resposta térmica do sistema e o comportamento geomecânico. Além de Ferreira (2017), Bandeira Neto (2015) apresenta um estudo experimental de avaliação da resposta térmica de uma estaca trocadora de calor confeccionada no *campus* da Universidade de São Paulo em São Carlos. Os principais resultados quanto ao comportamento geomecânico no fim do aquecimento dos ensaios realizados por Ferreira (2017) estão apresentados neste item.

Nos ensaios realizados por Ferreira (2017), os extensômetros nas cotas de 2,27 e 10,38 apresentaram as maiores temperaturas, conforme Figuras 16 e 17. As maiores deformações foram obtidas na ponta da estaca, no entanto, no segundo ensaio as deformações na ponta foram menores que no primeiro ensaio. A menor deformação ocorreu na cota de 8,21 no primeiro ensaio e na cota de 9,3 no segundo ensaio. As deformações em cada ensaio estão apresentadas nas Figuras 18 e 19.

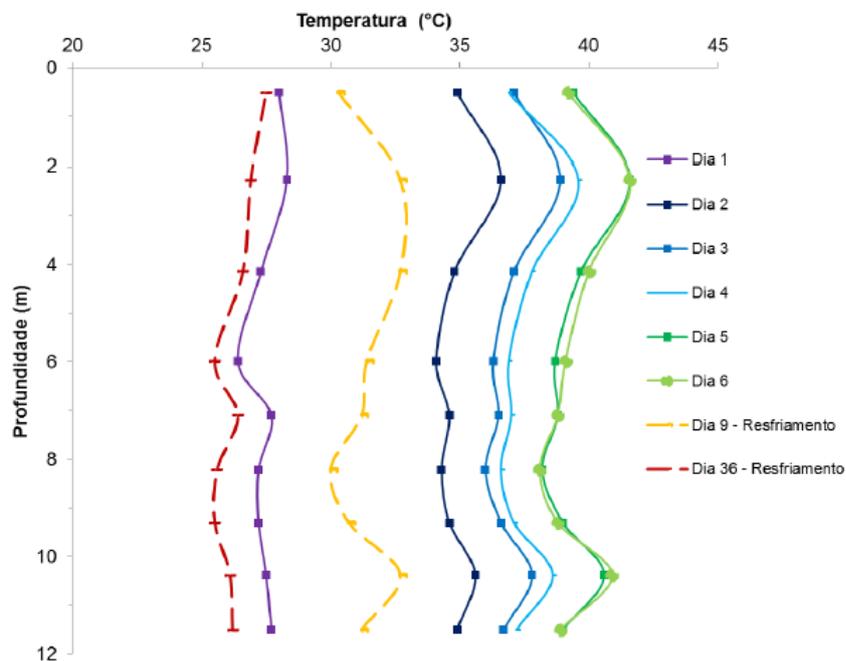


Figura 16 - Temperatura dos termopares do concreto durante o primeiro ensaio (Ferreira, 2017).

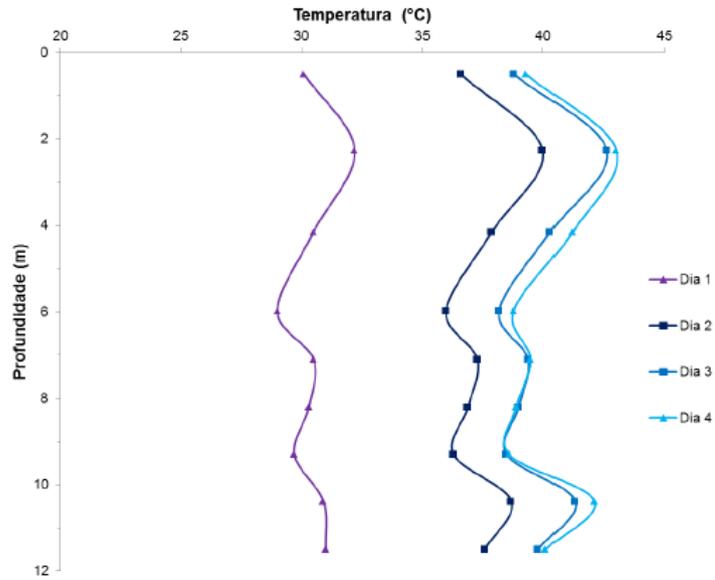


Figura 17 - Temperatura dos termopares do concreto durante o segundo ensaio (Ferreira, 2017).

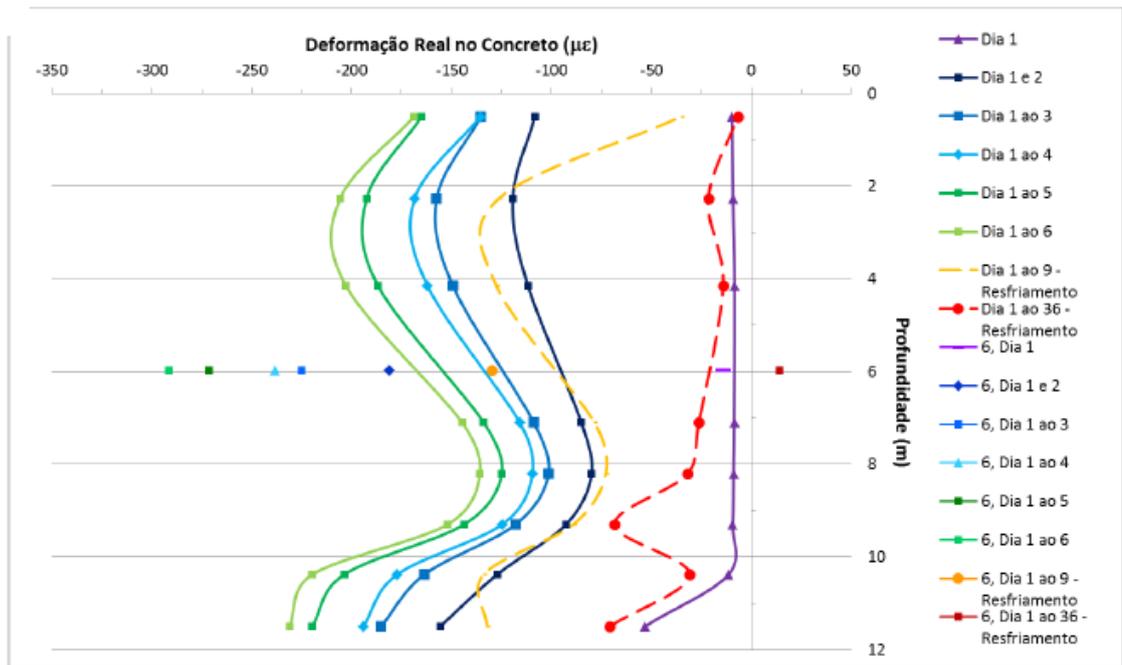


Figura 18 - Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o primeiro ensaio (Ferreira, 2017).

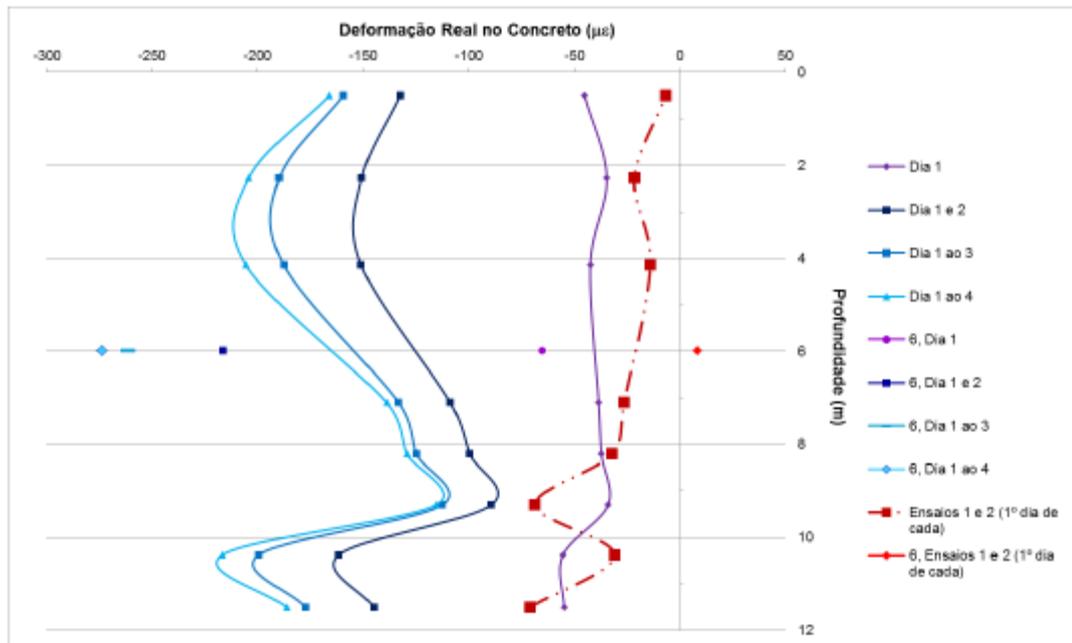


Figura 19 - Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o segundo ensaio (Ferreira, 2017).

### 3- MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Ensaio Experimental

O ensaio foi realizado em estaca geotérmica localizada no campus da UENF, em Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro. A estaca é do tipo raiz, possui 0,40 m de diâmetro e 12 m de profundidade. No início do projeto apresentado nessa dissertação a estaca já estava confeccionada e já havia sido utilizada por Ferreira (2017).

O maciço onde a estaca geotérmica está embutida não apresenta uniformidade sendo este composto por diferentes camadas conforme descrito em sondagem SPT realizada em junho de 2017 (ANEXO I). Figura 21 apresenta a posição do furo de sondagem em relação à estaca. A sondagem demonstra que o solo, até a profundidade da estaca geotérmica, é predominantemente arenoso com uma camada de argila mole de cerca de 2 m de espessura localizada na cota de 8,75 m.

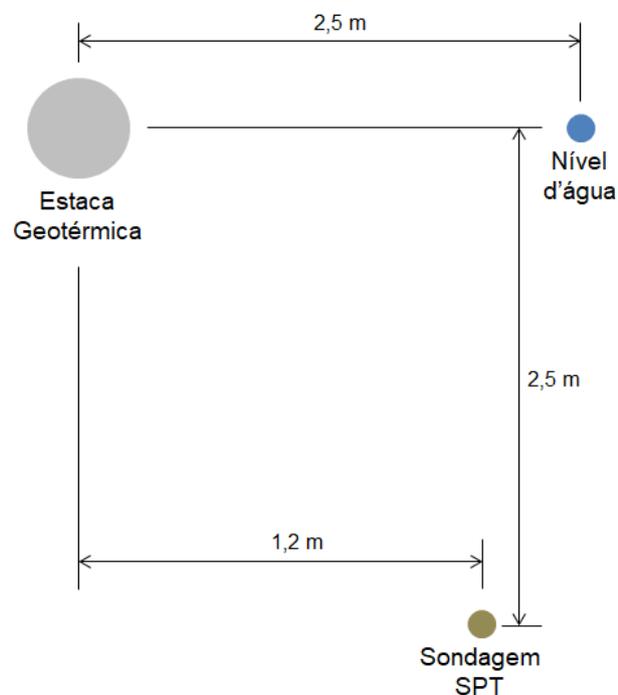


Figura 20 - Posição do furo de sondagem e do nível d'água em relação à estaca geotérmica.

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

Conforme apresentado na Figura 21a, foram utilizadas 3 barras longitudinais de 9,5 mm de diâmetro na estaca e estribos espaçados a cada 20 cm. O sistema trocador de calor presente na estaca foi colocado preso junto à armação longitudinal. O sistema consiste de tubulação PEX-A monocamada de 25 mm de diâmetro externo e 2,3 mm de espessura.

A estaca foi instrumentada por extensômetros com medidores de temperatura, Modelo 4150 na armadura (Figura 21b) e Modelo 4200 no concreto (Figura 21c), ambos da marca Geokon. A leitura dos instrumentos dispostos na estaca foi feita utilizando um leitor de fios vibratórios, Modelo GK-404 da marca Geokon (Figura 21d). A Figura 22 apresenta esquematicamente a distribuição dos extensômetros na armadura e no concreto.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21 - (a) armadura e sistema trocador de calor no interior da estaca; (b) extensômetro com medidor de temperatura na armadura; (c) extensômetro com medidor de temperatura do concreto; (d) leitor de corda vibrante. (Ferreira, 2017).

Além dos equipamentos presentes na estaca, foram utilizados equipamentos auxiliares para circulação d'água, medição da vazão de entrada, aquecimento e quadro de coleta de dados, medidor de temperatura externa e a variação no nível d'água no terreno em furo de sondagem a 2,5 metros da estaca. Figura 20 apresenta a posição do furo de sondagem para medição do nível d'água em relação à estaca. Figura 22 apresenta à disposição, no local do ensaio, de alguns dos equipamentos citados neste parágrafo.

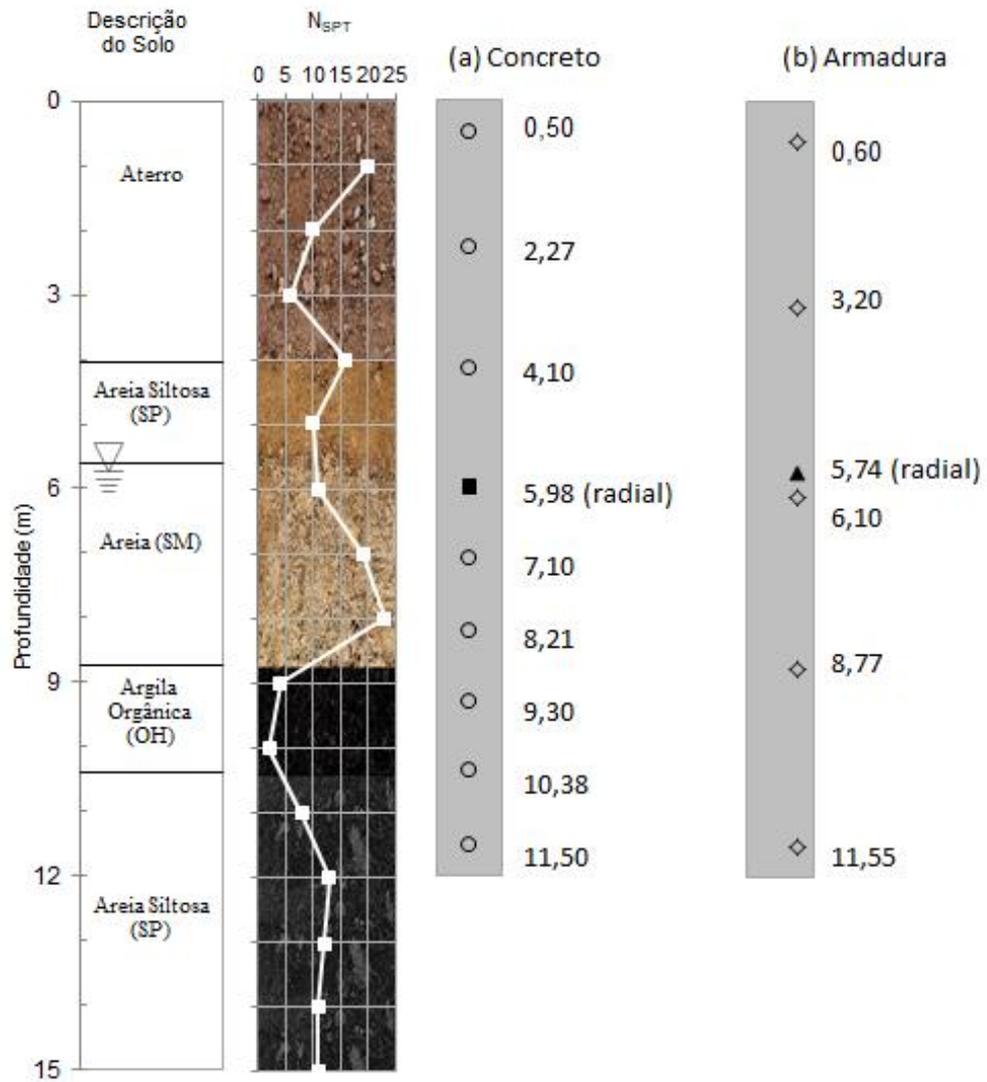


Figura 22 - Disposição dos extensômetros e termopares no interior da estaca geotérmica: (a) concreto; (b) armadura.



Figura 23 – Equipamentos auxiliares utilizados na realização do ensaio experimental. (Ferreira, 2017).

Diferentemente dos ensaios anteriores realizados por Ferreira (2017), neste ensaio foi medido o deslocamento da cabeça da estaca com a utilização de dois relógios comparadores, com precisão de 0,01 mm, fixados em viga metálica de 4 m de comprimento. Para reduzir os efeitos da temperatura ambiente incidindo na viga metálica e nos relógios, uma lona plástica, com as extremidades abertas para que não houvesse acúmulo de calor, foi utilizada para a proteção do local (Figura 24).



*Figura 24 - Proteção com lona plástica na viga de referência utilizada na medição do deslocamento da cabeça da estaca.*

O comprimento da viga metálica utilizada no ensaio como referência para medição do deslocamento de topo foi estabelecido em 4 m para que o ensaio atendesse aos requisitos da norma ABNT NBR 12131 (2006) “*Estacas: Prova de carga estática*”, pois o ensaio descrito na norma tem procedimento análogo ao realizado nesta pesquisa. A norma estabelece distância mínima de 1,5 m entre a estaca e o apoio da viga de referência com o objetivo de evitar possíveis interferências da movimentação do maciço durante o ensaio. Além disso, a norma estabelece que a viga de referência deva ser simplesmente apoiada. Para diminuir os efeitos da expansão da viga nas leituras, tendo em vista que o ensaio foi longo, a base adotada como apoio, apresentada na Figura 25, precisou ser lisa e lubrificada com vaselina de modo que a viga pudesse trabalhar livre longitudinalmente.



*Figura 25 - Apoio da viga de referência lubrificada no contato entre a viga e o apoio.*

Durante o ensaio os relógios comparadores foram monitorados por câmeras, conforme mostrado na Figura 26. Isso se fez necessário para que se mantivesse a confiabilidade das leituras diretas feitas no relógio comparador, garantindo que nenhum agente externo pudesse interferir na viga de referência no intervalo das leituras.

O ensaio durou quatro dias e foi interrompido quando a temperatura e deformações da estaca já não apresentavam mais alterações significativas para o carregamento térmico aplicado, ou seja, o sistema de troca de calor já tinha chegado ao pico de sua eficácia.



Figura 26 - Monitoramento das leituras de deslocamento da cabeça da estaca.

### 3.2 – Comportamento Termomecânico do Ensaio Experimental

Na análise dos resultados do ensaio experimental convencionou-se que sinal positivo são deformações de compressão e sinal negativo são deformações de tração.

Para a avaliação do comportamento termomecânico da estaca geotérmica obteve-se por meio de transdutor por corda vibrante (Figura 21d) a temperatura e a frequência de ressonância ( $f$ ) dos extensômetros distribuídos no interior da estaca geotérmica. Uma vez que as medições de deformações ( $\varepsilon$ ) foram feitas pelas frequências de ressonância, foi necessária a conversão para micro-strain ( $\mu\varepsilon$ ) com a utilização dos fatores de conversão ( $G$ ) estabelecidos pelo fabricante dos extensômetros, sendo  $G$  igual a  $3,304 \times 10^{-3}$  para o concreto e igual a  $0,39102 \times 10^{-3}$  para o aço. A conversão é calculada pela Equação 3.2.1:

$$\varepsilon = -G f^2 \quad (3.2.1)$$

Em seguida, as deformações foram convertidas em deformações térmicas ( $\varepsilon_T$ ) pela Equação 3.3.2 corrigida em relação ao alongamento do fio metálico do extensômetro:

$$\varepsilon_T = [(\varepsilon_i - \varepsilon_0)B + \alpha_s \Delta T] \quad (3.2.2)$$

onde  $B$  é uma constante de calibração dos extensômetros igual a 0,975 para o concreto e 0,91 para o aço,  $\varepsilon_i$  é a leitura de deformação num dado instante  $i$ ,  $\varepsilon_0$  é a leitura de deformação no início do ensaio,  $\Delta T$  é a diferença entre as leituras de temperatura no instante  $i$  e no início do ensaio, e  $\alpha_s$  é o coeficiente de expansão térmica do fio metálico do extensômetro igual a  $-12,2 \mu\varepsilon/^\circ C$ .

Como explicado no item 2.2 do capítulo 2, caso a estaca geotérmica estivesse livre para se expandir com o carregamento térmico, a deformação térmica seria livre ( $\varepsilon_{T,livre}$ ) e calculada pela Equação 2.2.1:

$$\varepsilon_{T,livre} = -\alpha_c \Delta T \quad (2.2.1)$$

onde  $\alpha_c$  é coeficiente de expansão térmica do concreto igual a  $0,016 mm/^\circ C$  (Ferreira, 2017).

E, a tensão termicamente induzida ( $\sigma_T$ ) é calculada pela diferença entre a deformação térmica ( $\varepsilon_{T,Obs}$ ) obtida pela leitura do extensômetro e a deformação térmica livre ( $\varepsilon_{T,livre}$ ). Essa tensão térmica gerada é influenciada pela resistência lateral, pela resistência de ponta e pelo carregamento que possa estar presente sobre a estaca (Mimouni e Laloui, 2013). A tensão térmica é então calculada pela Equação 2.2.2:

$$\sigma_T = E(\varepsilon_{T,Obs} - \varepsilon_{T,livre}) \quad (2.2.2)$$

sendo  $E$  o módulo de elasticidade do concreto armado que é igual a 30 GPa.

O atrito mobilizado ( $f_{s,mob,j}$ ) na interface solo-estaca pode ser calculado pela diferença entre as tensões térmicas utilizando a Equação 3.2.3:

$$f_{s,mob,j} = \frac{(\sigma_{T,j} - \sigma_{T,j-1})D}{4\Delta l} \quad (3.2.3)$$

onde o subscrito  $j$  refere-se ao extensômetro localizado em certa profundidade e  $j - 1$  o extensômetro imediatamente abaixo,  $D$  é o diâmetro da estaca e  $\Delta l$  é a distância entre os extensômetros. Pela convenção de sinais adotada neste trabalho, valores positivos de atrito mobilizado indicam movimento ascendente enquanto valores negativos indicam movimento descendente.

Por meio das leituras de deformações térmicas é também possível calcular o deslocamento acumulado ( $\delta_{T,i}$ ) dos pontos médios entre os extensômetros considerando deslocamento igual à zero no ponto nulo. O deslocamento pode ser calculado pela Equação 3.2.4:

$$\delta_{T,i} = \delta_{T,i-1} + \frac{1}{2}(\varepsilon_{T,i-1} + \varepsilon_{T,i})\Delta l \quad (3.2.4)$$

### 3.3 – Modelo de Transferência de Carga de Chen e McCartney (2016)

A análise do comportamento termomecânico da estaca geotérmica foi feita pela aplicação do modelo de transferência de carga em diferenças finitas proposto por Chen e McCartney (2016). Esse modelo foi aplicado a experimentos *in loco* e em escala reduzida e demonstrou resultados satisfatórios na sua utilização para previsão do comportamento de estaca geotérmica submetida ao carregamento térmico, e dentre essas aplicações uma delas chama atenção para possível aplicação desse modelo no experimento realizado nesta dissertação. Trata-se do experimento *in loco*, em estaca de dimensões semelhantes ao desta dissertação, realizado por Murphy *et al.* (2015) onde o solo foi considerado uniforme apesar de apresentar diferentes camadas.

Inicialmente, algumas importantes considerações são feitas na aplicação desse modelo:

- Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha_c$ ) e módulo de elasticidade ( $E$ ) é constante ao longo da estaca;
- Movimentos ascendentes e expansão são negativos, movimentos descendentes e tensão de compressão são positivos;
- Ocorrência de “ponto nulo” devido ao carregamento térmico (Bourne-Webb *et al.* 2009), sendo este dependente das condições de contorno (resistência lateral, resistência de ponta e carregamento mecânico) da estaca geotérmica;
- Resistência lateral última pode ser constante ao longo da estaca (Método  $\alpha$ ) ou pode aumentar linearmente com a profundidade (Método  $\beta$ ).

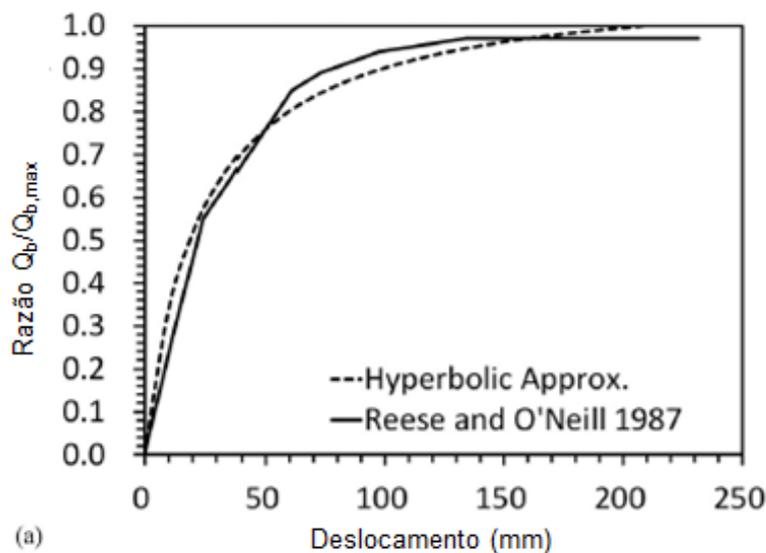
O comportamento elástico de cada elemento é feito pelo cálculo da rigidez  $K$  pela Equação 3.3.1, onde  $L^i$  é o comprimento do elemento e  $A_b$  é a área da seção transversal da estaca:

$$K^i = EA_b/L^i \quad (3.3.1)$$

A reação da base da estaca contra o solo é feita utilizando-se um modelo não linear de rigidez, uma curva Q-z, que relaciona a razão ( $f_{Q-z}$ ) entre a força mobilizada na ponta pela resistência última de ponta com o deslocamento axial da ponta. Nesse modelo, a curva Q-z utilizada foi proposta por O'Neill e Reese (1987), que está apresentada na Figura 27a, e é representada pela Equação 3.3.2 obtida por aproximação Hiperbólica.

Analogamente à curva Q-z, foi utilizada uma curva T-z, apresentada na Figura 27b, que relaciona a razão ( $f_{T-z}$ ) entre a força mobilizada na lateral pela resistência lateral última com o deslocamento axial lateral. Ressalta-se que a curva T-z, na aplicação desse modelo, é independente da variação de temperatura, pois Murphy e McCartney (2014) defendem que a curva T-z não é sensível à temperatura. A curva T-z utilizada também foi proposta por O'Neill e Reese (1987) e é representada pela Equação 3.3.3 obtida por aproximação com modelo Hiperbólico.

$$f_{Q-z}(\rho_b^n) = \rho_b^n / (a_b + b_b \rho_b^n) \quad (3.3.2)$$



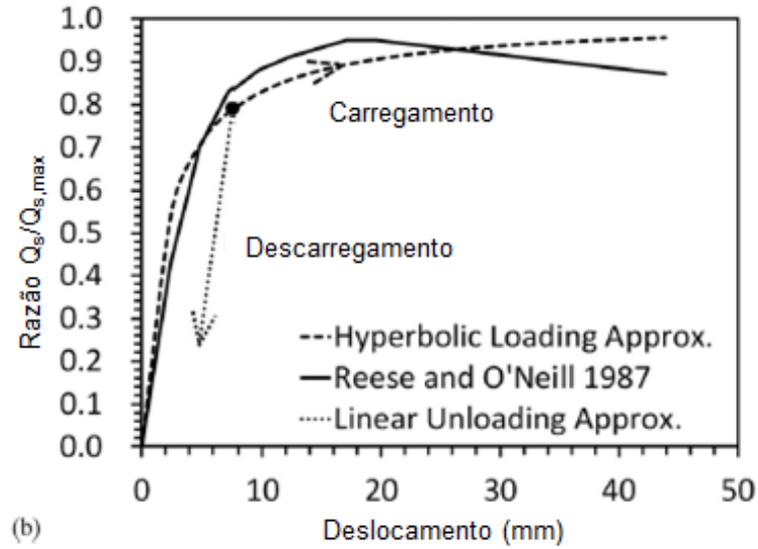


Figura 27 – Curva resistência mobilizada por deslocamento: (a) curva Q-z; (b) curva T-z. (Chen e McCartney, 2016).

$$f_{T-z}(\rho_s^i) = \begin{cases} \rho_s^i / a_s + b_s \rho_s^i & \text{para carregamento} \\ \rho_s^i / a_s + \frac{Q_s^i}{Q_{s,max}^i} - \left( \frac{1}{\frac{Q_{s,max}^i}{Q_s^i} - b_s} \right) & \text{para descarregamento} \end{cases} \quad (3.3.3)$$

Nas Equações 3.3.2 e 3.3.3, os parâmetros  $a_s$ ,  $b_s$ ,  $a_b$  e  $b_b$  definem a forma das curvas T-z e Q-z de acordo com o tipo de classificação dada à estaca geotérmica quanto à combinação de restrição lateral e de ponta. Os valores apresentados na tabela a seguir foram obtidos por Murphy *et al.* (2015), Murphy e McCartney (2015) através de experimentos. Os valores utilizados na aplicação do modelo nessa pesquisa são para o caso de fundações *Semi-Floating* (semi flutuantes).

Tabela 1 - Parâmetros de forma das curvas T-z e Q-z obtidos por Murphy *et al.* (2015) e Murphy e McCartney (2015). (Chen e McCartney, 2016).

	Flutuante	Ponta	Semi-flutuante
$a_s$	0.0035	-	0.0035
$b_s$	0.9	-	0.9
$a_b$	$\infty$	0.002	0.002
$b_b$	$\infty$	0.9	0.9

Conforme citado nas considerações da aplicação do modelo, pode ser utilizado o Método  $\alpha$  ou o Método  $\beta$  para o cálculo da resistência lateral. Nesta pesquisa, o Método  $\beta$  será adotado. Além disso, foi considerado um impacto do aumento de temperatura na resistência lateral devido à expansão da estaca geotérmica e um fator de redução proposto por McCartney e Rosenberg (2011) foi utilizado. Assim, a Equação da resistência lateral última sensível à temperatura é representada pela Equação 3.3.4:

$$Q_{l,T,max}^i = \beta A_s^i \sigma'_v(z) [K_0 + (K_p - K_0)K_T] \tan \phi' \quad (3.3.4)$$

onde  $\beta$  é um fator de redução associado ao processo de instalação da estaca (o  $\beta$  reflete um maior ou menor confinamento e reflete na distribuição de tensão da estaca),  $\sigma'_v(z)$  é tensão efetiva vertical e  $K_0$  é o coeficiente de empuxo lateral do solo:

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (3.3.5)$$

$K_p$  é o coeficiente de empuxo passivo do solo:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (3.3.6)$$

e  $K_T$  é o fator de redução sensível à temperatura:

$$K_T = k \alpha_T \Delta T \left( \frac{D/2}{0,02 L} \right) \quad (3.3.7)$$

onde  $k$  é um coeficiente que representa a resistência do solo contra a expansão e foi assumido igual a 65, baseado nas referências bibliográficas do modelo. E  $\Delta T$  representa a variação de temperatura sofrida pela estaca geotérmica.

Nesta pesquisa, dispõe-se do resultado de SPT para que seja feita a caracterização do solo onde a estaca está embutida. Para aplicação do modelo Chen e McCartney (2016), devido ao uso do Método  $\beta$  no cálculo da resistência lateral e adoção do fator de redução proposto por McCartney e Rosenberg (2011), é necessário o uso de correlações do número de golpes do SPT para determinação do ângulo de atrito (Equação 3.3.8 de Teixeira, 1996) e do peso específico do solo (Godoy, 1972).

$$\phi = \sqrt{20N_{SPT}} + 15^\circ \quad (3.3.8)$$

Tabela 2 - Peso específico de solos argilosos. (Godoy, 1972).

$N_{SPT}$	Consistência	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
$\leq 2$	Muito Mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
$\geq 20$	Dura	21

Tabela 3 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972).

$N_{SPT}$	Compacidade	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		
		Areia Seca	Areia Úmida	Areia Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco compacta			
9 - 18	Mediamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

Tabela 4 – Obtenção de parâmetros representativos do solo.

z(m)	$N_{spt}$	Camada	$N_{spt}$ média	$\phi$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
0	-	argila arenosa	13	31,12	17
1	20	argila arenosa			
2	10	argila arenosa			
3	6	argila arenosa			
4	16	argila arenosa			
5	10	areia siltosa	10	29,14	19
6	11	areia	17	33,44	20
7	19	areia			
8	23	areia			
9	4	argila siltosa	3	22,75	15
10	2	argila siltosa			
11	8	areia siltosa	11	29,83	20
12	13	areia siltosa			
13	12	areia siltosa			
14	11	areia	11	29,83	20
15	11	areia			
				29,35	18,50

Conforme Tabela 4, o ângulo de atrito representativo do solo será de 29,35 ° e peso específico representativo do solo será de 18,50 kN/m<sup>3</sup>. Foi utilizada a tensão efetiva na aplicação do modelo nas camadas abaixo do nível d'água. Além disso, foi necessário o cálculo da resistência de ponta da estaca e para isso dois métodos foram adotados para que um comparativo pudesse ser feito, Aoki-Velloso (1975) e Teixeira (1996).

$$Q_{b,max} = 290 \text{ kN (Teixeira)}$$

$$Q_{b,max} = 653 \text{ kN (Aoki-Velloso)}$$

Para que seja feita a análise das reações ao longo da estaca geotérmica com a aplicação do modelo, a estaca é então discretizada em  $n$  elementos. Um valor inicial de deslocamento da base ( $\rho_{b,T}^n$ ) é então assumido e a resistência mobilizada ( $Q_{b,T}^n$ ) correspondente é então calculada pela Equação 3.3.9. Posteriormente, calcula-se a média da força axial ( $Q_{ave,T}^n$ ) do elemento  $n$  pela média da força na base do elemento ( $Q_{b,T}^n$ ) e no topo do elemento ( $Q_{t,T}^n$ ), que é inicialmente zero, conforme Equação 3.3.10. Utilizando-se a média da força axial calculada e a rigidez ( $K^n$ ) do elemento  $n$ , calcula-se a compressão elástica ( $\Delta_T^n$ ) do pela Equação 3.3.11. Em seguida, com a Equação 3.3.12 calcula-se o deslocamento lateral ( $\rho_{l,T}^n$ ) do elemento pela soma do deslocamento da base com a metade da compressão elástica e calcula-se a força lateral mobilizada ( $Q_{l,T}^n$ ) recorrendo-se ao gráfico da curva T-z e a resistência lateral última ( $Q_{l,max}^n$ ) correspondente ao elemento, conforme Equação 3.3.13. Por último, calcula-se uma nova força no topo do elemento ( $Q_{t,T,nova}^n$ ) que substituirá a força anterior  $Q_{t,T}^n$ , inicialmente igual a zero, pela Equação 3.3.14. O processo é repetido iterativamente utilizando-se a nova força no topo do elemento ( $Q_{t,T,nova}^n$ ) a partir da Equação 3.3.10 até que a diferença entre a nova força no topo ( $Q_{t,T,nova}^n$ ) e a força anterior do topo do elemento ( $Q_{t,T}^n$ ) seja menor que uma tolerância estabelecida, que nesta pesquisa foi de  $10^{-10}$ .

$$Q_{b,T}^n = Q_{b,max} \times f_{Q-z}(\rho_{b,T}^n) \quad (3.3.9)$$

$$Q_{ave,T}^n = (Q_{b,T}^n + Q_{t,T}^n)/2 \quad (3.3.10)$$

$$\Delta_T^n = Q_{ave,T}^n / K^n \quad (3.3.11)$$

$$\rho_{l,T}^n = \rho_{b,T}^n + \Delta_T^n / 2 \quad (3.3.12)$$

$$Q_{l,T}^n = Q_{l,max}^n \times f_{T-z}(\rho_{l,T}^n) \quad (3.3.13)$$

$$Q_{t,T,nova}^n = Q_{b,T}^n + Q_{l,T}^n \quad (3.3.14)$$

Depois de alcançada diferença menor que a tolerância estabelecida, o processo descrito no parágrafo anterior é repetido ao elemento seguinte. O superescrito  $n$  é a partir disso substituído por  $i$ . Para isso, o valor da força do topo do elemento ( $Q_{l,T}^i$ ) encontrado anteriormente é atribuído, pela Equação 3.3.15, ao valor da força de base do elemento seguinte ( $Q_{b,T}^{i-1}$ ), que passará pela iteração descrita no parágrafo anterior. Além da força, o deslocamento da base do elemento seguinte ( $\rho_{b,T}^{i-1}$ ) também é calculado a partir de valores encontrados no elemento anterior, conforme Equação 3.3.16.

$$Q_{b,T}^{i-1} = Q_{l,T}^i \quad (3.3.15)$$

$$\rho_{b,T}^{i-1} = \rho_{b,T}^i + \Delta_T^i \quad (3.3.16)$$

Ao ser calculado o valor da força no topo do primeiro elemento ( $Q_{l,T}^1$ ) para o  $\rho_{b,T}^n$  atribuído, esperasse que esse seja igual ao valor do carregamento mecânico ( $P$ ) existente sobre a estaca. Nesta pesquisa, o valor de  $P$  é zero devido à ausência de carregamento mecânico. Em caso de não convergência entre  $Q_{l,T}^1$  e  $P$ , é utilizado o método de Newton para o cálculo de um novo valor de deslocamento da base ( $\rho_{b,T,novo}^n$ ) pelas Equações 3.3.17 e 3.3.18. Uma vez atribuído o novo deslocamento da base, todo processo é repetido até que a diferença entre a nova força no topo do primeiro elemento e a antiga seja menor que a tolerância estabelecida, que nesta pesquisa foi de  $10^{-10}$ .

$$k_{sec} = Q_{b,T}^1 / \rho_{b,T}^n \quad (3.3.17)$$

$$\rho_{b,T,novo}^n = \rho_{b,T}^n + k_{sec}(P - Q_{l,T}^1) \quad (3.3.18)$$

Como citado anteriormente, o surgimento de um ponto nulo é uma importante consideração em se tratando de carregamento térmico. O ponto nulo na aplicação do modelo é definido onde a soma da resistência mobilizada na parte superior é igual à resistência mobilizada na parte inferior, conforme explicado por Knellwolf et al. (2011). As Equações 3.3.19, 3.3.20 e 3.3.21 juntamente com a Equação 3.3.9 são utilizadas na obtenção do ponto nulo.

$$\sum_{i=1}^{NP} Q_{l,T}^i + Q_{t,T}^1 = \sum_{i=NP+1}^n Q_{l,T}^i + Q_{b,T}^n \quad (3.3.19)$$

$$Q_{t,T}^1 = K_h \times \rho_{t,T}^1 \quad (3.3.20)$$

$$Q_{b,T}^n = Q_{b,max} \times f_{Q-z}(\rho_{b,T}^n) \quad (3.3.9)$$

$$Q_{l,T}^i = Q_{l,max}^i \times f_{T-z}(\rho_{l,T}^i) \quad (3.3.21)$$

onde  $K_h$  representa a rigidez da cabeça da fundação, nesta pesquisa o valor que melhor correspondeu aos resultados experimentais foi de 100000 MN/mm. De acordo com Knellwolf *et al.* (2011), a rigidez da cabeça da estaca depende de diversos fatores tais como rigidez da estrutura suportada, tipo de contato entre a fundação e a estrutura, a posição e o número de estacas no bloco de coroamento. O deslocamento  $\rho_{t,T}^1$  é o deslocamento do topo do primeiro elemento.

Na aplicação do modelo, as primeiras deformações dos elementos discretizados, de comprimento  $L^i$ , para o início do processo de iteração são calculadas pela Equação 3.3.22 assumindo a estaca sem restrições ao seu movimento.

$$\Delta_T^i = L^i \alpha \Delta T \quad (3.3.22)$$

Na parte da estaca abaixo do ponto nulo o movimento dos elementos é do ponto nulo para baixo quando aquecida. Assim, o deslocamento de cada elemento abaixo do ponto nulo é calculado pelas Equações 3.3.23, 3.3.24 e 3.3.25.

$$\rho_{t,T}^i = \begin{cases} 0 & \text{para } i = n_1 + 1 \\ \rho_{b,T}^{i-1} & \text{para } i \neq NP \end{cases} \quad (3.3.23)$$

$$\rho_{l,T}^i = \rho_{t,T}^i + \frac{\Delta_T^{NP+1}}{2} \quad (3.3.24)$$

$$\rho_{b,T}^i = \rho_{l,T}^i + \Delta_T^{NP+1} \quad (3.3.25)$$

Ao ser alcançado o elemento  $n$  (quando  $i = n$ ), na base da estaca, o deslocamento calculado é aplicado na Equação 3.3.9, que utiliza a curva Q-z ( $f_{Q-z}$ ), para calcular a força mobilizada da resistência de ponta.

Em seguida, a partir do elemento  $n$  até o ponto nulo, a resistência lateral mobilizada em cada elemento é calculada pela Equação 3.3.26, que utiliza a curva T-z na zona de carregamento ( $f_{T-z}^{carregamento}$ ). A partir da resistência de ponta mobilizada e a resistência lateral mobilizada no elemento  $n$ , calcula-se pela Equação 3.3.28 a resistência mobilizada no topo do elemento, que é também atribuída ao valor da resistência mobilizada na base do elemento exatamente acima do elemento  $n$ , e sucessivamente até o ponto nulo. Uma vez calculada as resistências mobilizadas na base e no topo do elemento, calcula-se a tensão térmica axial mobilizada ( $\sigma_T^i$ ) em cada elemento pela Equação 3.3.29, onde  $A_b$  é a área da seção transversal da estaca geotérmica. Depois, calcula-se na Equação 3.3.30 uma nova deformação ( $\Delta_{T,atual}^i$ ) para cada elemento que deverá ser menor que a deformação livre calculada pela Equação 3.3.22 e substituirá esta nas seguintes iterações até que se atinja um valor menor que a tolerância na diferença entre a nova e a antiga (da iteração anterior) deformação.

$$Q_{l,T}^i = Q_{l,max}^i \times f_{T-z}^{carregamento}(\rho_{l,T}^i) \quad (3.3.26)$$

$$Q_{t,T}^i = Q_{l,T}^i + Q_{b,T}^i \quad (3.3.28)$$

$$\sigma_T^i = \frac{Q_{t,T}^i + Q_{b,T}^i}{2A_b} \quad (3.3.29)$$

$$\Delta_{T,atual}^i = \Delta_T^i - \frac{\sigma_T^i L_i}{E} \quad (3.3.30)$$

Para a parte da estaca acima do ponto nulo o movimento dos elementos é do ponto nulo para cima quando aquecida. Analogamente, ao cálculo dos deslocamentos dos elementos abaixo do ponto nulo, o deslocamento de cada elemento acima do ponto nulo é calculado pelas Equações 3.4.31, 3.4.32 e 3.4.33.

$$\rho_{l,T}^i = \begin{cases} 0 & \text{para } i = n_1 \\ \rho_{b,T}^{i+1} & \text{para } i \neq NP - 1 \end{cases} \quad (3.3.31)$$

$$\rho_{l,T}^i = \rho_{l,T}^i - \frac{\Delta_T^i}{2} \quad (3.3.32)$$

$$\rho_{b,T}^i = \rho_{l,T}^i - \Delta_T^i \quad (3.3.33)$$

Quando o primeiro elemento é alcançado (quando  $i = 1$ ), a resistência mobilizada no topo de cada elemento é calculada pela Equação 3.3.34. A resistência lateral mobilizada em cada elemento é calculada pela Equação 3.3.35, que utiliza a curva T-z na zona de descarregamento ( $f_{T-z}^{descarregamento}$ ). A partir da resistência de topo e a resistência lateral mobilizada no elemento 1, calcula-se pela Equação 3.3.36 a resistência mobilizada na base do elemento, que é também atribuída ao valor da resistência mobilizada no topo do elemento exatamente abaixo do elemento 1, e sucessivamente até o ponto nulo. Após calculas as resistências mobilizadas em cada elemento, o processo na parte superior da estaca segue o mesmo procedimento explicado acima para o calculo da tensão térmica axial mobilizada ( $\sigma_T^i$ ) pela Equação 3.3.29 e uma nova deformação para cada elemento ( $\Delta_{T,atual}^i$ ) pela Equação 3.3.30, que substituirá esta nas seguintes iterações até que se atinja um valor menor que a tolerância na diferença entre a nova e a antiga (da iteração anterior) deformação.

$$Q_{t,T}^i = \begin{cases} K_h \times \rho_{t,T}^i & \text{para } i = 1 \\ Q_{b,T}^{i-1} & \text{para } i \neq 1 \end{cases} \quad (3.3.34)$$

$$Q_{l,T}^i = Q_{l,max}^i \times f_{T-z}^{descarregamento}(\rho_{l,T}^i) \quad (3.3.35)$$

$$Q_{b,T}^i = Q_{t,T}^i - Q_{l,T}^i \quad (3.3.36)$$

Após as iterações das partes inferior e superior da estaca para certo valor de ponto nulo, é necessário conferir se a posição do ponto nulo está correta e caso não esteja, é necessário recalcular um novo valor para o ponto nulo e topo o processo é repetido. A posição do ponto nulo é conferida pela Equação 3.3.37, da foça não balanceada  $F_{n\grave{a}obalanceada}$ . Caso o valor de  $F_{n\grave{a}obalanceada}$  seja menor que a tolerância estabelecida, significa que o ponto nulo da iteração está correto. Se  $F_{n\grave{a}obalanceada}$  é positivo, significa que o ponto nulo verdadeiro está abaixo do ponto nulo utilizado na iteração. Se  $F_{n\grave{a}obalanceada}$  é negativo, significa que o ponto nulo verdadeiro está acima do ponto nulo utilizado na iteração.

$$F_{n\grave{a}obalanceada} = |Q_{t,T}^{n_1+1} - Q_{b,T}^{n_1}| \quad (3.3.37)$$

## 4- RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 – Resultados do comportamento termomecânico

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da análise descrita no item 3.2. Os resultados estão apresentados para algumas variações significativas de temperatura média na estaca ( $\Delta T_{médio} = 4^{\circ}C; 8,1^{\circ}C; 10,5^{\circ}C; 14,8^{\circ}C$ ), que visualmente melhor representam o comportamento da estaca. Durante todo o ensaio o nível d'água foi observado na cota de 5,75 m.

As figuras 28 e 29a mostram a variação de temperatura em cada termopar do concreto no interior da estaca. Na Figura 29a nota-se que o medidor de temperatura na cota de 9,3 m registrou a menor temperatura no início ( $19,1^{\circ}C$ ) e no decorrer do ensaio. Na Figura 28 os termopares nas cotas de 0,5 e 9,3 m registraram as menores variações de temperatura durante todo o ensaio. Esses dois pontos possivelmente apresentam maior condutibilidade térmica, pois perdem mais calor para o solo circundante. Na cota de 0,50 m a proximidade com o ambiente externo pode também ter gerado maior perda de calor. O medidor da cota de 9,3 m parece estar na camada de argila mole onde a percolação é menor e conseqüentemente a troca de calor com o solo na região deveria ser também menor (Lhendup *et al.*, 2014). No entanto, o termopar foi colocado próximo ao limite entre a camada de areia e argila mole e devido à imprecisão da sondagem pode-se considerar que a cota está na camada de areia, com maior permeabilidade e conseqüente maior troca de calor.

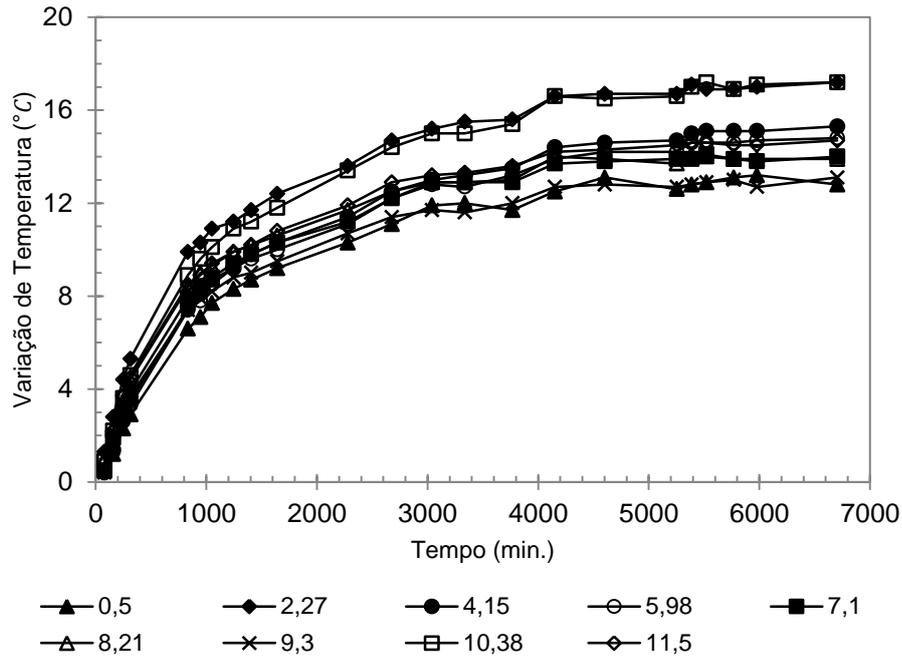


Figura 28 - Variação de temperatura dos termopares do concreto durante o ensaio.

Na Figura 29b são apresentadas as deformações axiais do concreto na cota onde os extensômetros foram posicionados calculadas pela Equação 3.2.2, e a distribuição de deformação axial livre para variação média de temperatura de  $14,8^{\circ}\text{C}$  calculada pela Equação 2.2.1. O extensômetro na cota de 10,38 m apresentou maior deformação, indicando baixa resistência lateral no solo circundante à cota. Isso possivelmente está associado à presença de argila mole que oferece baixa resistência ao atrito lateral na interface solo-estaca. Os extensômetros das cotas de 0,50 e 11,50 m também apresentaram grandes deformação, bem próximas a deformações livre apresentada no gráfico. Isso possivelmente está associado ao fato de o topo da estaca estar livre e a baixa resistência de ponta oferecida pelo solo. Deformações próximas a condição livre acontecem pela baixa rigidez oferecida na região. Os extensômetros nas cotas intermediárias tiveram menores deformações térmicas, essa zona é mais restrita pelo solo com camadas que apresentam os maiores número de golpes no ensaio SPT quando comparadas as outras camadas.

Na Figura 29b está apresentada também a deformação térmica radial da estaca geotérmica para variação média de temperatura máxima, que foi de  $14,8^{\circ}\text{C}$ . Foi obtido um valor de  $-211\mu\epsilon$ , que está bem próximo ao valor da deformação livre igual a  $-235\mu\epsilon$ . Apesar de o valor obtido ser relativamente alto, a deformação radial da estaca geotérmica não parece trazer diferenças significativas no comportamento

da estaca. De acordo com Olgun *et al.* (2014), expansão radial em pequena magnitude não parece resultar em significativo aumento da resistência lateral devido a um possível aumento da pressão de contato solo-estaca.

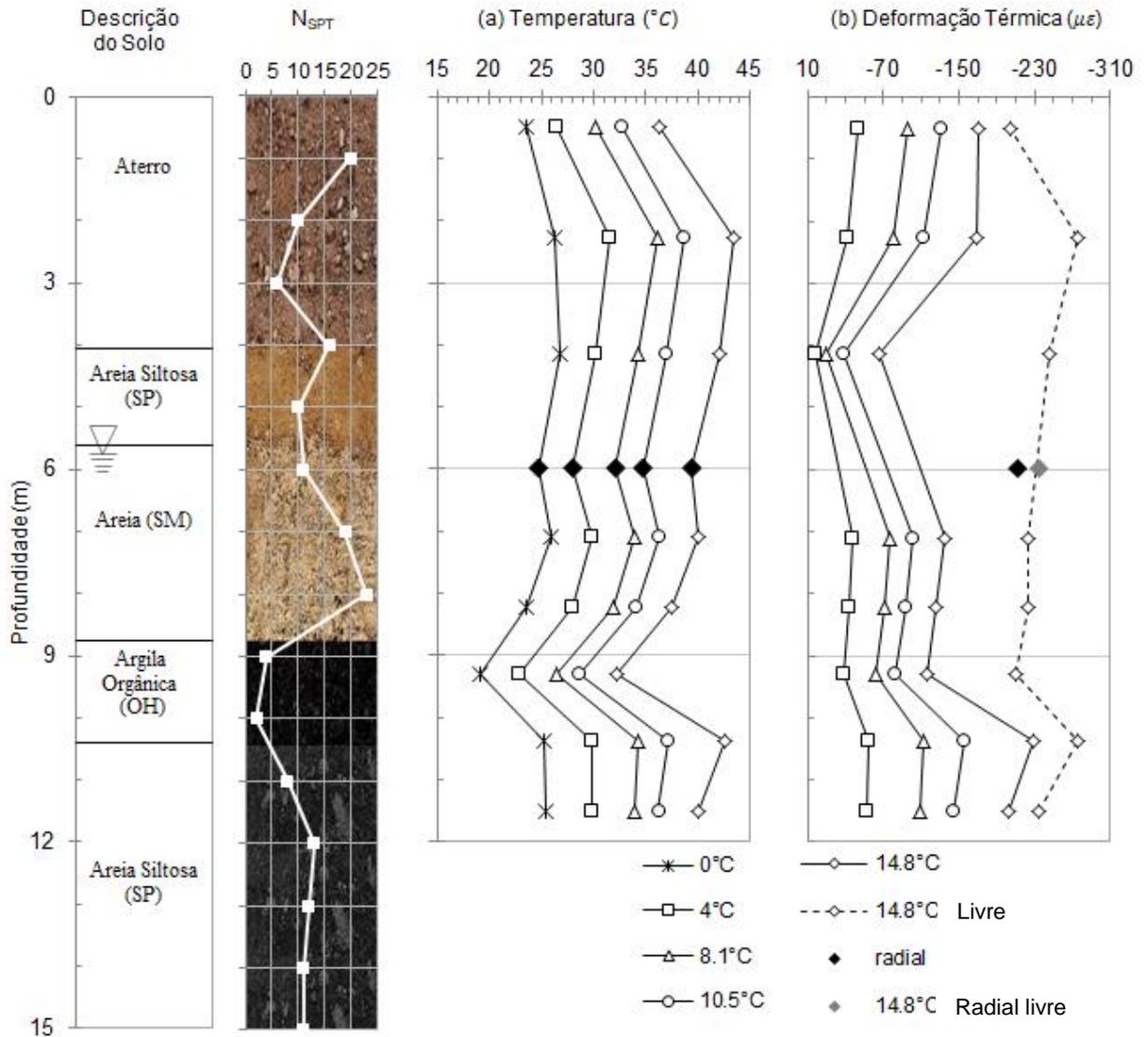


Figura 29 - (a) Temperatura dos termopares do concreto durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do concreto durante o ensaio.

A Figura 30a mostra a variação de temperatura dos termopares embutidos na armação da estaca geotérmica. É possível notar que, diferentemente do que ocorre no concreto, as temperaturas nas diferentes cotas ao longo do eixo axial da estaca não variam significativamente entre elas. Isso possivelmente ocorre devido a maior condutibilidade térmica do aço e também pelo fato de não estar em contato direto com o solo. Conforme citado no item 2.3 do capítulo 2, a variação térmica imposta na tubulação trocadora de calor tende a ser uniforme na estaca, e o fato de o aço ter

melhor condutibilidade facilita a obtenção e uniformização da temperatura. A Figura 31a mostra no mesmo gráfico a variação de temperatura do concreto e do aço que foram apresentadas nas Figuras 29a e 30a. É possível notar que mesmo em termopares próximos, os valores de variação de temperatura variam entre o aço e o concreto. Assim como explicado anteriormente, a condutibilidade térmica do aço é maior que a do concreto e possivelmente sofre menos interferência do solo circundante. Assim, nas camadas de solo onde a troca de calor é maior o concreto tenderá a ter menor temperatura do que o aço.

Na Figura 30b são apresentados os resultados de deformação térmica obtidas na armadura da estaca calculados pela Equação 3.2.2. Infelizmente não foi possível a leitura do extensômetro na cota de 0,60m que foi danificado durante a confecção da estaca. Assim como ocorreu na variação de temperatura, os valores de deformação térmica não variam significativamente. A Figura 31b mostra no mesmo gráfico a deformação térmica do concreto e do aço que foram apresentadas nas Figuras 29b e 30b. Novamente, as diferenças de deformação podem ser atribuídas a maior uniformização da distribuição de temperatura que ocorre apenas no aço. Além disso, por não ter contato direto com o solo, o aço parece ser menos afetado pelas condições de restrição citadas no item 2.2 do capítulo 2.

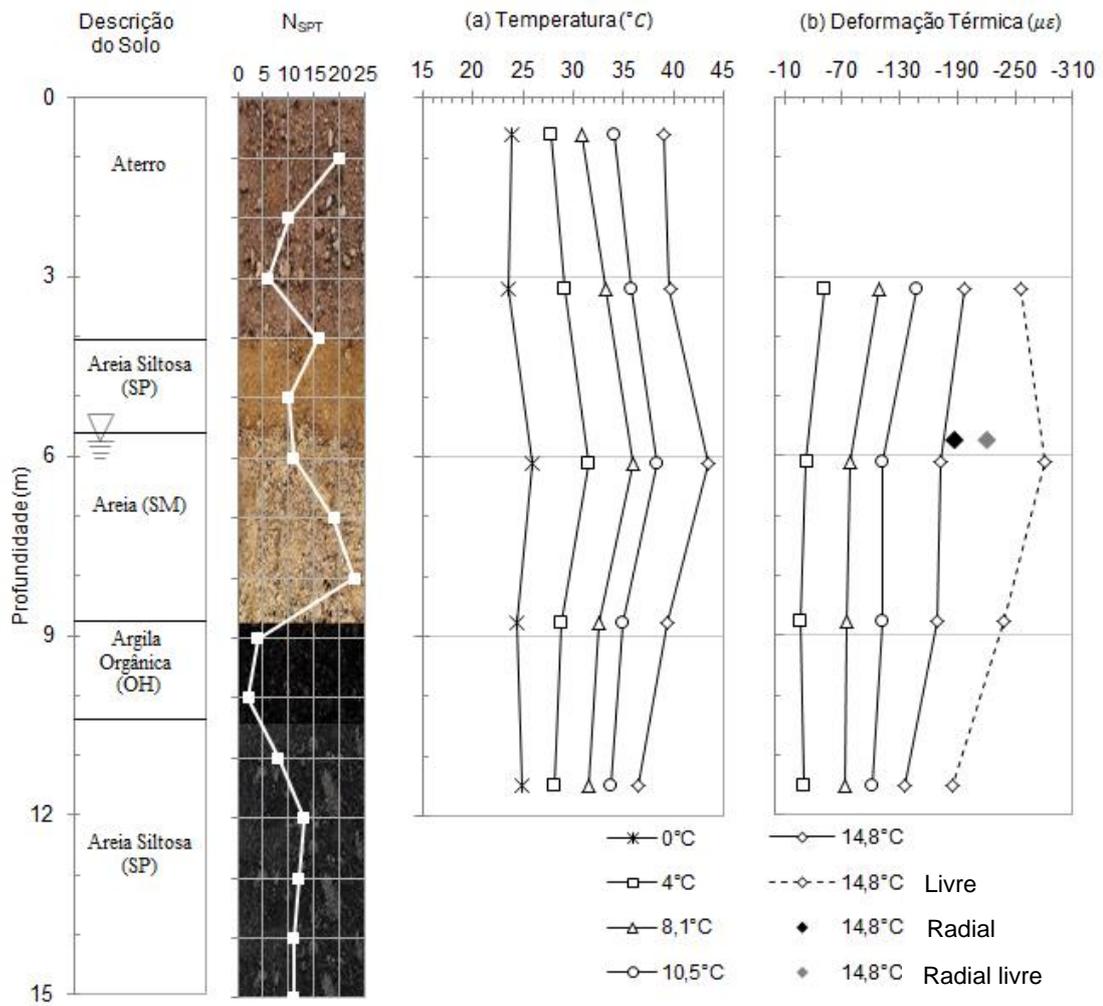


Figura 30 - (a) Temperatura dos termopares do aço durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do aço durante o ensaio.

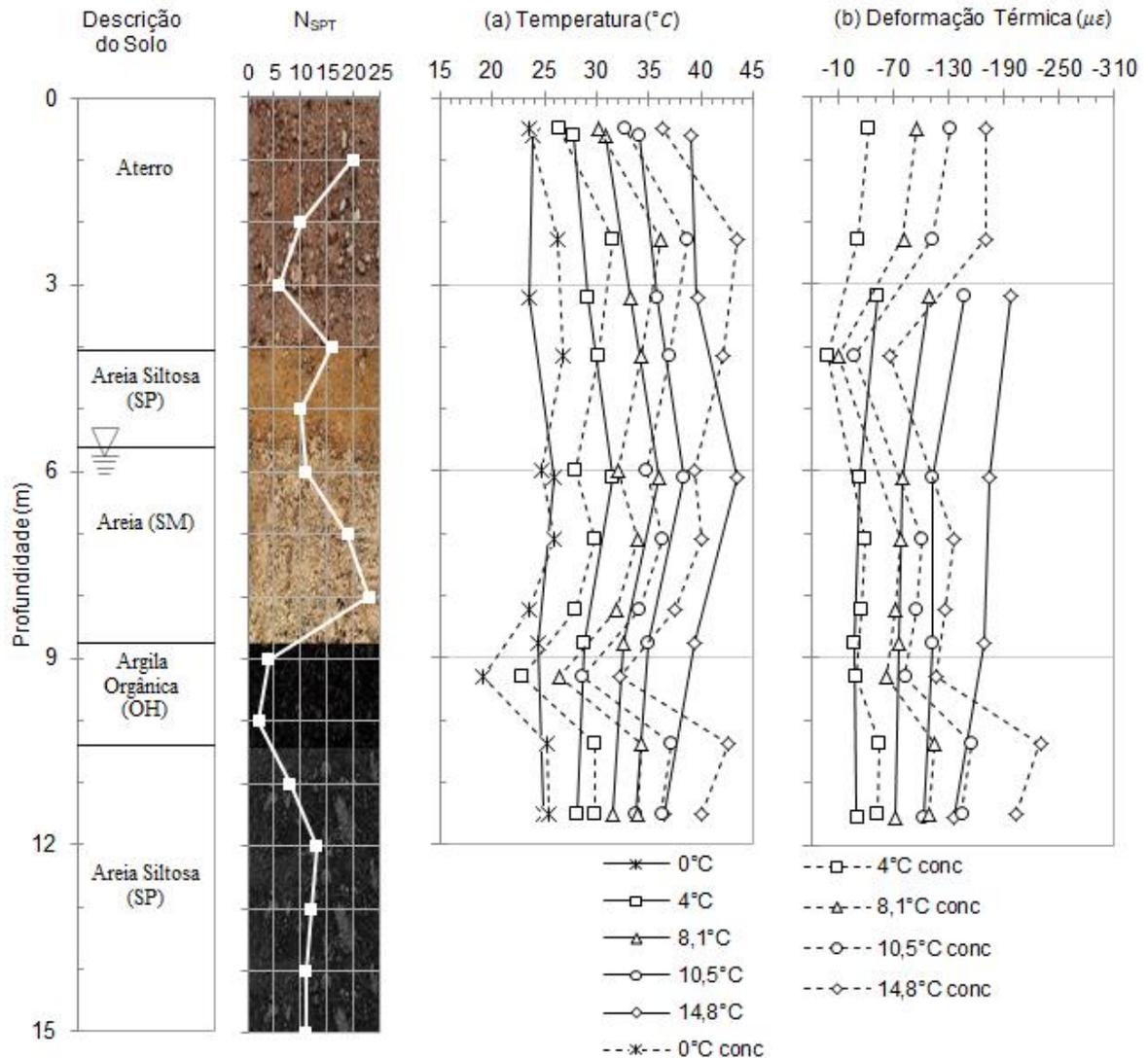


Figura 31 - (a) Temperatura dos termopares do aço (linha contínua) e do concreto (linha tracejada) durante o ensaio; (b) Deformação térmica dos extensômetros do aço (linha contínua) e do concreto (linha tracejada) durante o ensaio.

Os resultados apresentados nesta pesquisa em relação ao comportamento geomecânico estão focados nos resultados obtidos nos extensômetros do concreto. Apesar de o comportamento entre o aço e o concreto ser considerado homogêneo, o fato de o concreto estar em contato direto com o solo traz maior fidelidade em relação a interação solo-estaca.

Figura 32a mostra os resultados das variações de tensões térmicas calculadas pela Equação 2.2.2 e são conseqüentemente um reflexo das deformações térmicas. Pontos com menores restrições, ou seja, maiores deformações, apresentam menor tensão mobilizada na interface solo-estaca e

menor tensão de compressão na estaca. Maiores retrições foram obtidas na zona intermediária da estaca, especificamente na cota de 4,15 m. Isso ocorre possivelmente é devido a presença de uma camada de solo arenoso que apresenta as maiores resistências e se estende até a cota de 8,75 m.

Figura 32b apresenta as variações de atrito mobilizado calculadas pela Equação 3.2.3. De acordo com a convenção de sinais adotada, valores positivos de atrito mobilizado indicam deslocamento descendente da estaca e consequente mobilização ascendente de resistência, enquanto que valores negativos indicam deslocamento ascendente e consequente mobilização descendente de resistência. Os valores de atrito mobilizado aumentam ou diminuem com a variação de temperatura de acordo com a direção de deslocamento, no entanto mesmo com a elevação de temperatura durante o ensaio, as leituras dos extensômetros localizados nas cotas 7,1, 8,21 e 9,30 m não refletiram aumento ou diminuição significativa do atrito mobilizado mesmo com o aumento dos deslocamentos. Isso possivelmente está relacionado ao fato de que na condição não drenada na camada de argila mole não há aumento de mobilização de resistência para qualquer estado de tensão. Além disso, a pouca variação de resistência mobilizada na cota de 7,10 m está associada ao fato de que variação de temperatura não influencia no comportamento de solos granulares (Hueckel *et al.*, 2009; Loveridge *et al.*, 2017).

De acordo com Murphy *et al.* (2015), a profundidade onde o sinal do atrito mobilizado muda é considerado o local do ponto nulo, e maiores valores de tensão térmica também é um indicativo da proximidade do ponto nulo uma vez que essa coincide com o ponto de máxima tensão térmica. No entanto, a posição do ponto nulo não é constante e sua localização pode ser melhor obtida pelas leituras de deslocamento do topo da estaca, conforme será demonstrado a seguir. Além disso, nota-se na Figura 32b que o comportamento da camada de argila mole pode levar a uma consideração equivocada quanto ao ponto nulo.

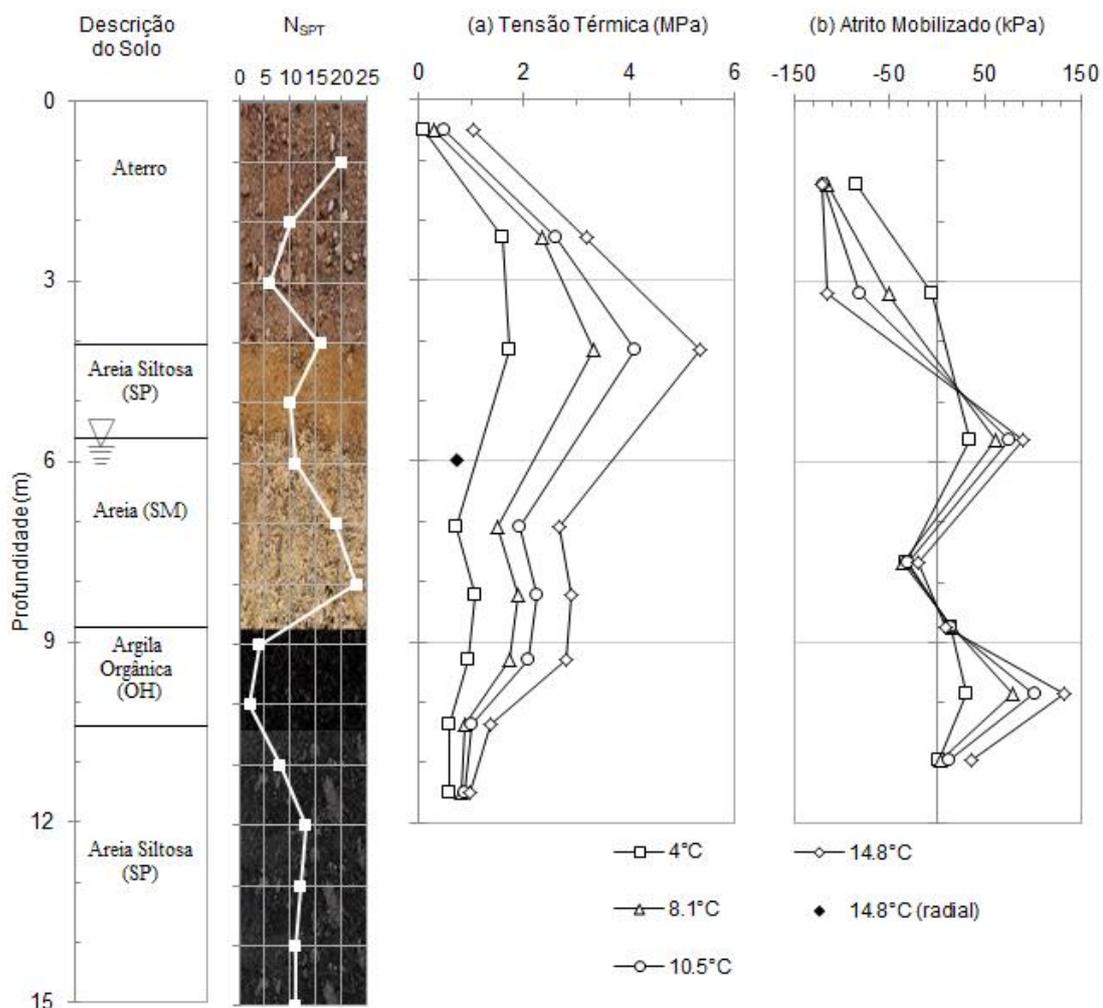
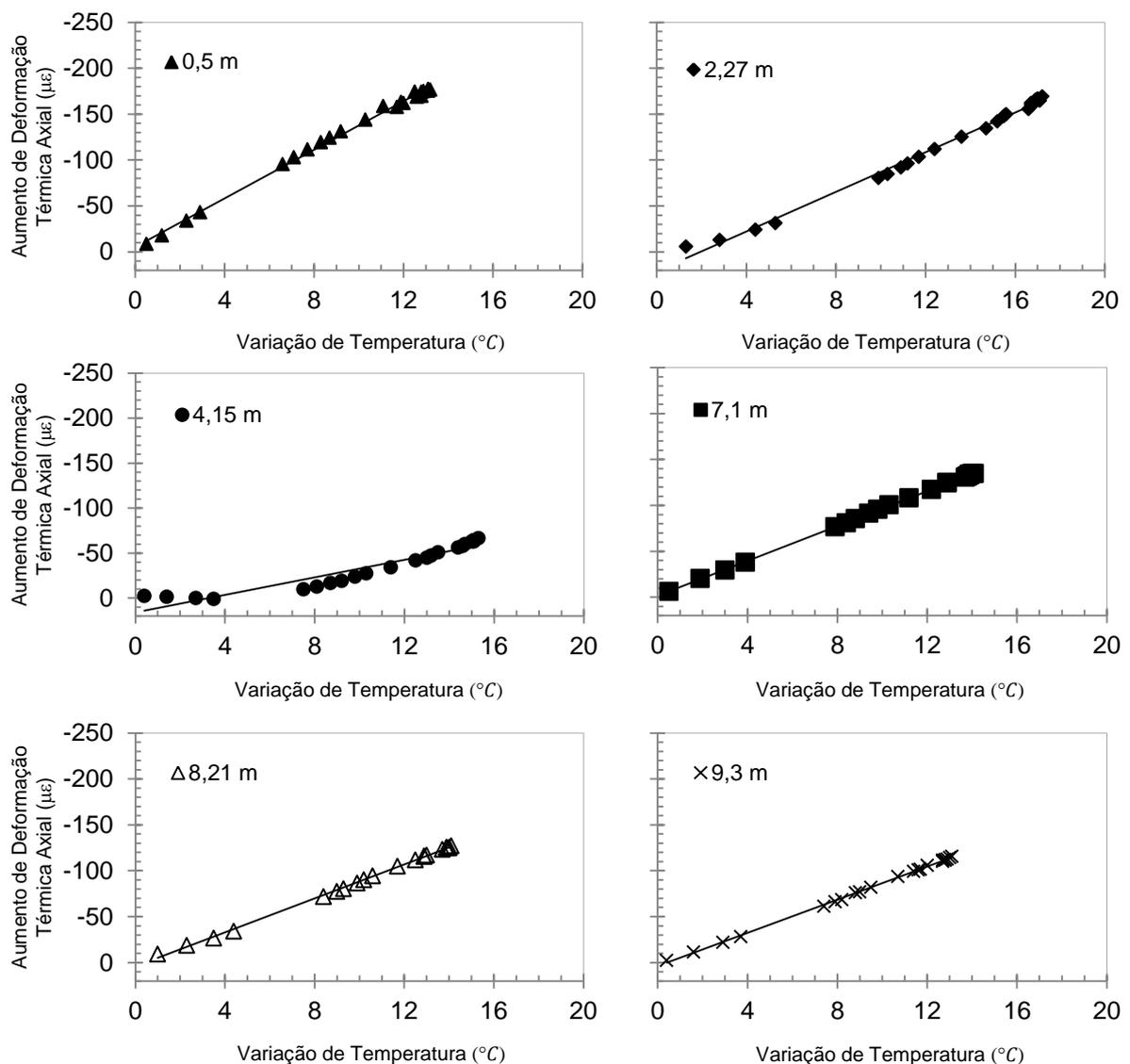


Figura 32 - (a) Tensão térmica mobilizada (MPa); (b) Atrito mobilizado (kPa).

Foi avaliado também nos resultados do ensaio os coeficientes de expansão térmica mobilizados ( $\alpha$  mobilizados) nas cotas de cada extensômetro da estaca geotérmica. O concreto utilizado na confecção da estaca apresenta coeficiente de expansão térmica de  $0,016\text{mm}/^\circ\text{C}$  (Ferreira, 2017), ou seja, esse valor refere-se ao coeficiente da estaca livre para expandir. No entanto, em se tratando de estaca geotérmica embutida no solo, os coeficientes de expansão térmica mobilizados refletem o comportamento do conjunto solo-estaca nos diferentes pontos ao longo do comprimento da estaca. A Figura 33 foi elaborada plotando-se o acréscimo de deformação axial pelo acréscimo de temperatura nos extensômetros. A partir dos pontos plotados no gráfico faz-se a regressão linear para cada extensômetro e a inclinação desta regressão é o coeficiente de expansão térmica mobilizado na cota onde está localizada o extensômetro. A Figura 34 apresenta a variação dos coeficientes de expansão mobilizados ao longo da estaca. Maiores valores de

expansão térmica foram obtidos nas extremidades da estaca, reafirmando as mesmas conclusões anteriormente discutidas na Figura 29b. A condição livre da cabeça da estaca e a baixa resistência de ponta possibilitaram a obtenção de elevados valores de coeficientes de expansão mobilizados nas extremidades. Cabe ressaltar que os valores apresentados de atrito mobilizado se referem ao período estacionário do sistema trocador de calor para a variação de temperatura imposta na estaca, logo, havendo aumento na variação de temperatura pela aplicação de uma maior carga térmica, possivelmente haveriam mudanças nos valores de atrito mobilizado.



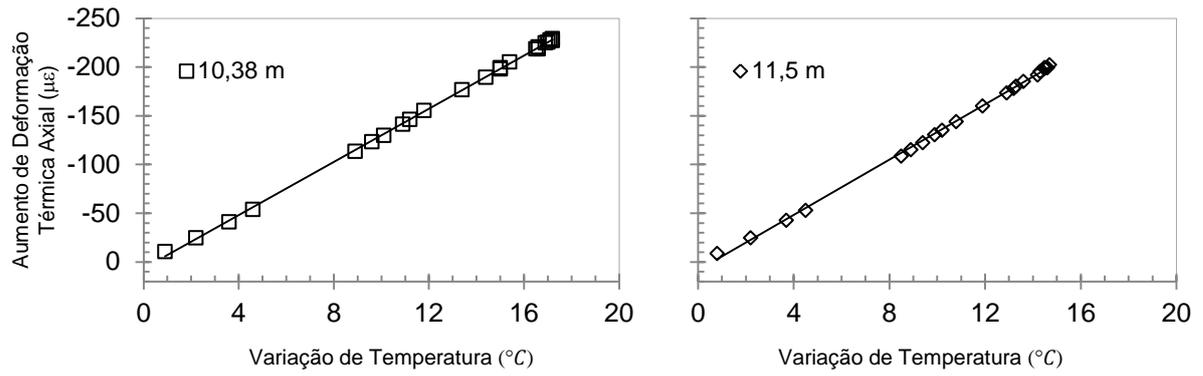


Figura 33 - Aumento de deformação térmica axial pela variação de temperatura de cada extensômetro axial do concreto para obtenção dos coeficientes de expansão térmica.

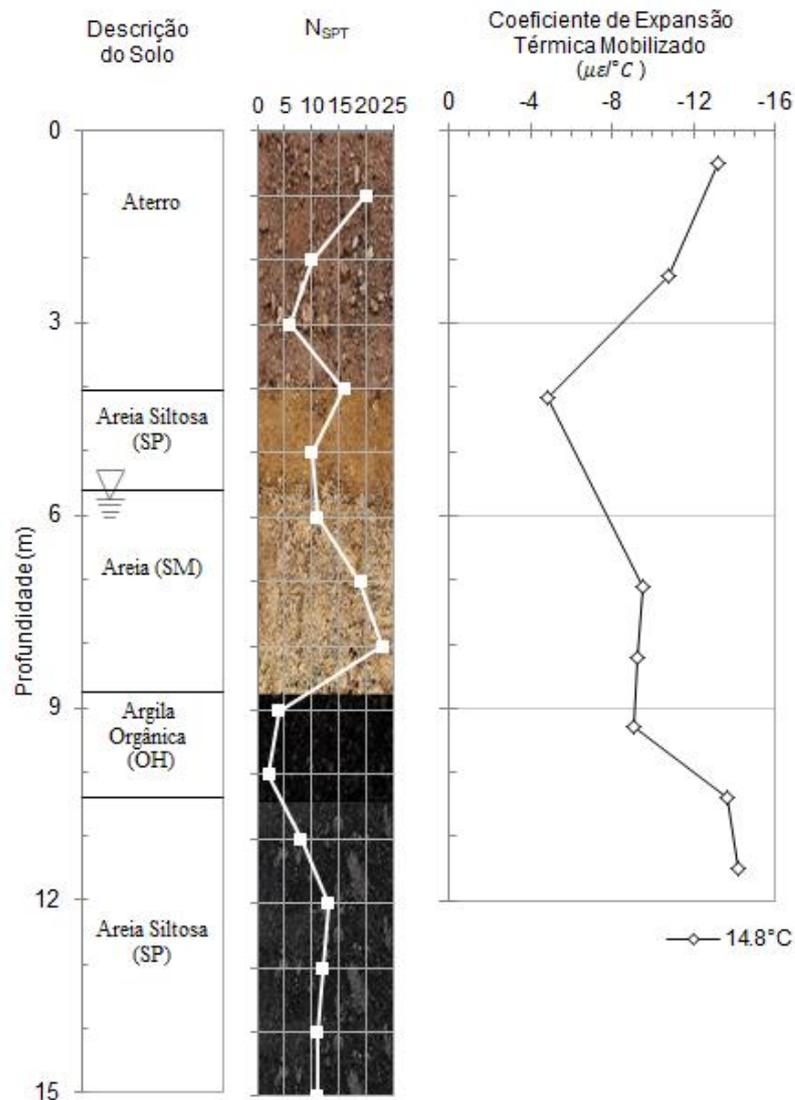


Figura 34 - Coeficientes de expansão térmica.

## 4.2 - Análise do Ponto Nulo

Os resultados apresentados acima são usualmente apresentados nas análises termomecânicas da maioria dos estudos em escala real. Essas análises têm sido usadas no fornecimento de parâmetros aplicados em projetos de estacas geotérmicas, no entanto, elas não disponibilizam o entendimento completo dos mecanismos presentes no comportamento termomecânico das estacas geotérmicas. Citando, por exemplo, a variação do ponto nulo durante o carregamento térmico e se o aumento ou diminuição da resistência lateral efetivamente ocorre. De acordo com Mimouni e Laloui (2013) o ponto nulo permanece estacionário na ocorrência de variação de temperatura, no entanto Rotta Loria *et al.* (2015) afirma o oposto baseado num rearranjo das tensões de resistência lateral e de ponta com a variação de temperatura. Com o objetivo de trazer melhor entendimento quanto ao comportamento termomecânico, recorreu-se as análises do grau de liberdade ( $n$ ) e dos deslocamentos.

As Figuras 35 e 36a mostram os valores calculados, pela Equação 2.2.4, dos graus de liberdade ( $n$ ) para cada ponto de medida de deformação. É possível notar a variação do grau de liberdade durante a aplicação da carga térmica. Essa variação está possivelmente associada à mudança das resistências mobilizadas lateral e de ponta, além da magnitude da variação de temperatura. É, no entanto, importante observar que o grau de liberdade na cota de 7,10 m permaneceu praticamente constante durante todo o carregamento térmico. Podendo tal fato ser explicado pela influência não significativa da variação de temperatura no comportamento de solos granulares. Isso corrobora com o que foi notado anteriormente na Figura 32b, de que solos granulares não são afetados pela variação de temperatura devido a sua alta permeabilidade e seu comportamento não é afetado pela geração de poropressão. Diferentemente do extensômetro da cota de 7,10 m, todos os extensômetros abaixo demonstram influência da poropressão gerada, possivelmente devido à presença da camada de argila mole. De acordo com Sutman (2016), um aumento de  $1^{\circ}\text{C}$  na temperatura do solo gera uma poropressão equivalente a 0,7% da tensão efetiva. Logo, quando um carregamento térmico é aplicada pode ocorrer um aumento da poropressão diminuindo a tensão efetiva no início, conseqüentemente o grau de liberdade aumenta como resultado da diminuição da resistência não

drenada. Nos intervalos entre as variações de temperatura média de  $4^{\circ}\text{C}$  até  $8.1^{\circ}\text{C}$  e de  $8.1^{\circ}\text{C}$  até  $10.5^{\circ}\text{C}$  o intervalo de tempo foi de cerca de 600 minutos e a poropressão gerada não pode ser dissipada aumentando o grau de liberdade, então no início do carregamento térmico a resistência lateral mobilizada na camada de argila mole diminui. Entre a variação de temperatura média de  $10.5^{\circ}\text{C}$  até  $14.8^{\circ}\text{C}$  o intervalo de tempo foi consideravelmente maior e o efeito em curto prazo da geração de poropressão em solos finos foi menor, conseqüentemente o grau de liberdade não mudou significativamente no intervalo.

Outra conclusão que pôde ser evidenciada a partir da Figura 36a é que a estaca se comporta como uma estaca semi-flutuante, pois o grau de liberdade alcança quase 1 na cota de 11,5m, que é bem próxima da ponta da estaca.

Ainda recorrendo-se ao grau de liberdade nota-se na Figura 35 que por curto período o extensômetro da cota de 4,15 m sofre compressão, conforme exposto no gráfico. Isso pode ter ocorrido como forma de reequilíbrio da estaca levando o ponto nulo, possivelmente próximo a essa cota, a um comportamento de contração.

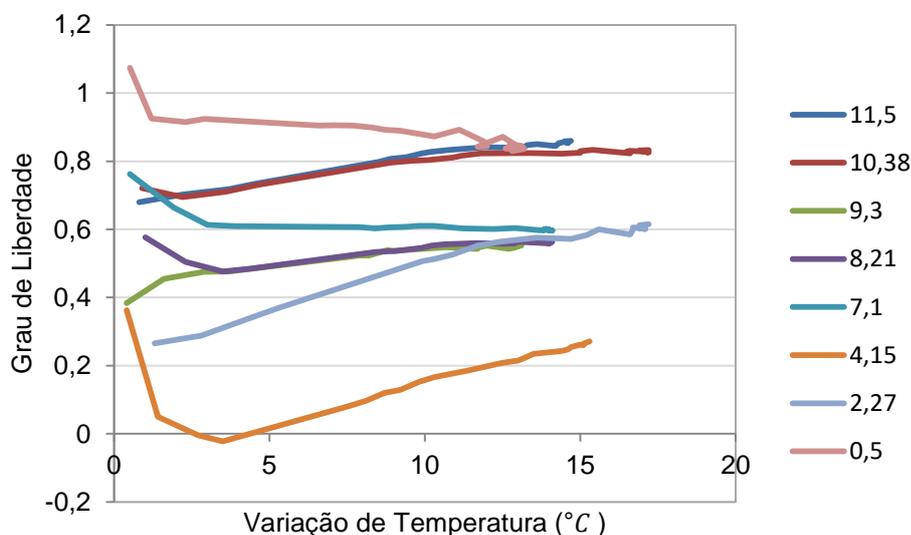


Figura 35 - Grau de liberdade pelo aumento de temperatura.

Figura 36b mostra os deslocamentos relativos de cada seção da estaca entre os extensômetros que foram calculados pela Equação 3.2.4. A localização do ponto nulo em cada variação de temperatura média está localizada onde o gráfico cruza o eixo das ordenadas, mudando seu sinal. Por interpolação entre os pontos mais

próximos do eixo das ordenadas pode-se chegar a um valor da cota do ponto nulo para cada variação de temperatura média.

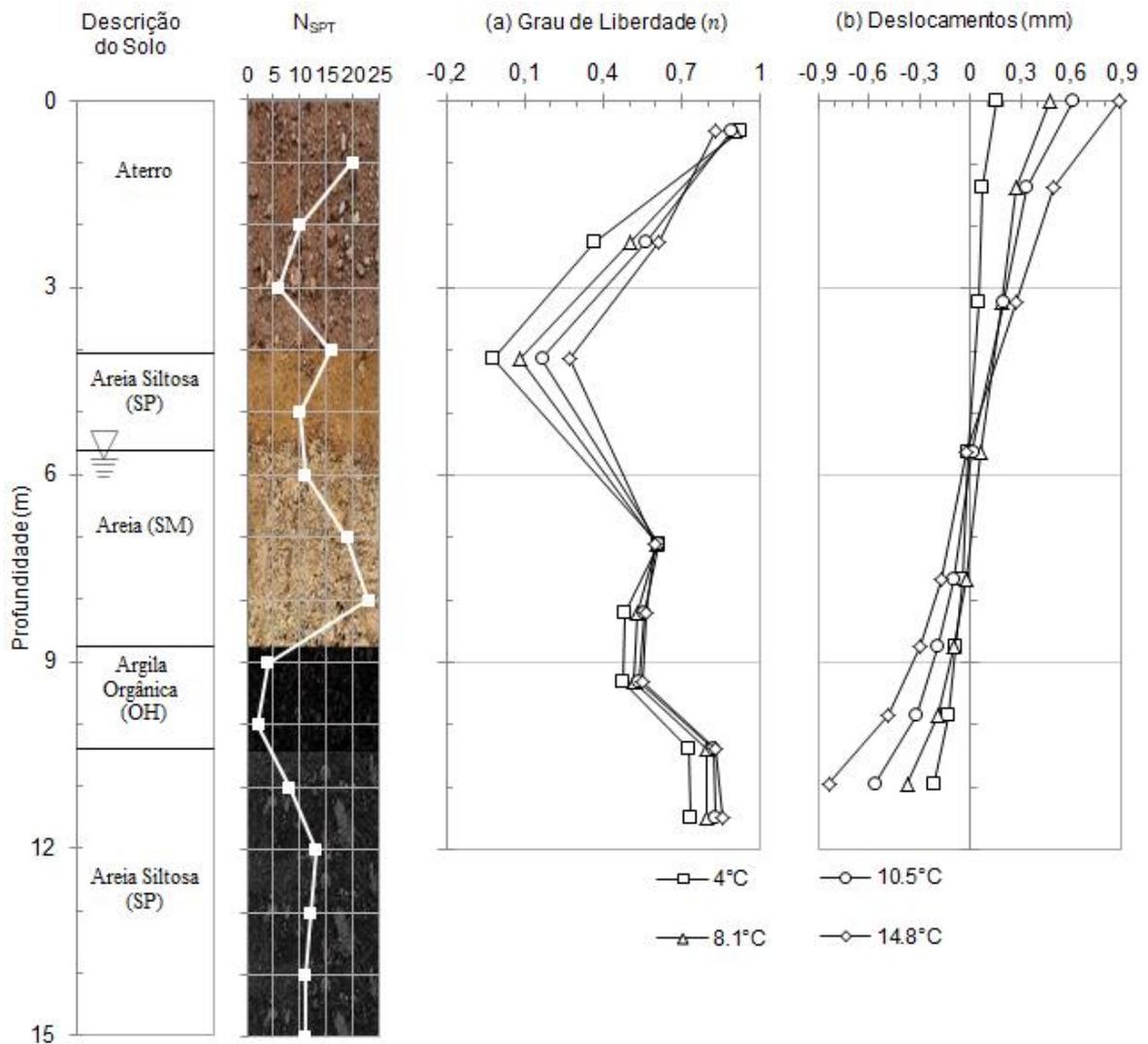


Figura 36 - (a) Grau de liberdade; (b) Deslocamentos a partir do deslocamento medido na cabeça da estaca (mm).

Figura 37 exhibe a média da variação do deslocamento da cabeça da estaca, além da variação de deslocamentos da ponta da estaca calculada pela Equação 3.2.4. Para calcular o deslocamento da ponta pela Equação 3.2.4, a média de variação de deslocamentos da cabeça da estaca foi considerada igual a variação total ascendente da estaca e diminuí-se os deslocamentos relativos de cada extensômetro até o último na cota de 11,50m. O deslocamento total da cabeça medido para  $\Delta T$  médio de  $14,8^{\circ}C$  foi de 0,86 e 0,9 mm, o deslocamento total médio da ponta calculado para o mesmo  $\Delta T$  médio foi de 0,83 mm.

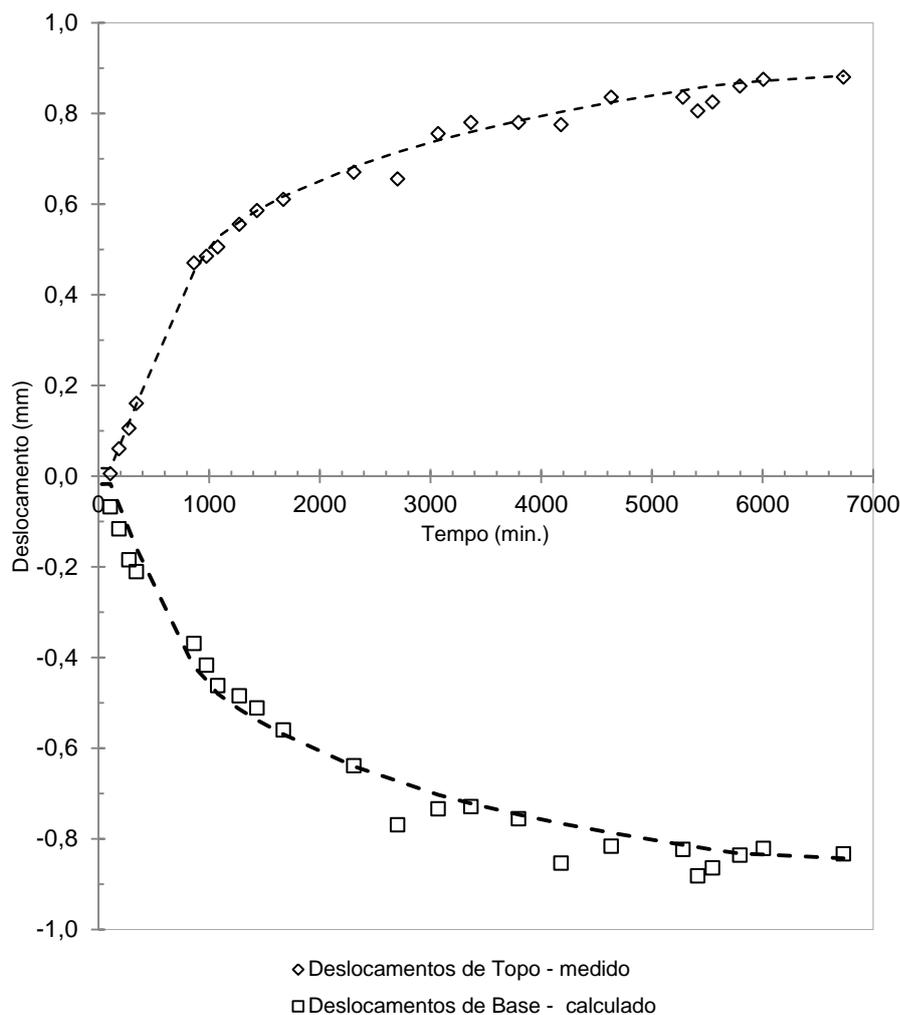


Figura 37 - Deslocamentos medidos da cabeça da estaca e deslocamentos calculados da ponta inferior durante o ensaio.

Figura 38 mostra todas as cotas do ponto nulo calculado para cada leitura durante o ensaio. A variação da localização do ponto nulo pode ser explicada separando seu comportamento em três estágios:

- 1- No início do carregamento térmico a estaca começa a se expandir e o aumento de deslocamentos eleva a mobilização de ambas resistências lateral e de ponta. O início da mobilização de resistência, especialmente a resistência de ponta, move o ponto nulo para baixo, ainda que a poropressão possa estar sendo gerada.
- 2- A partir da variação média de temperatura de  $8^{\circ}\text{C}$  a temperatura continua aumentando, no entanto consideravelmente mais lenta. A

resistência de ponta é menos mobilizada e a resistência lateral mobilizada na seção acima do ponto nulo continua aumentando. O aumento da resistência mobilizada na seção superior move o ponto nulo de forma ascendente.

- 3- Então, a poropressão gerada possivelmente começa a se dissipar e a seção inferior ao ponto nulo também obtém alguma resistência e o movimento ascendente do ponto nulo explicado no estágio 2 passa a ser mais lento.

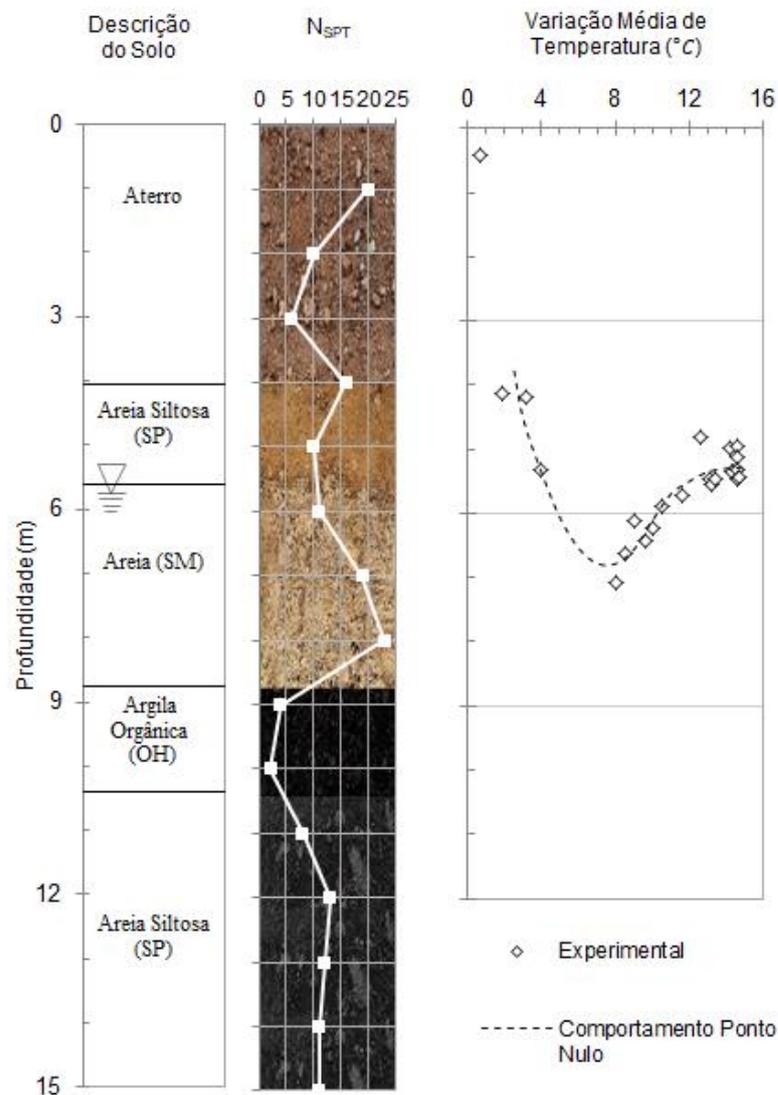


Figura 38 - Variação do Ponto Nulo durante o ensaio.

O movimento do ponto nulo explicado nos estágios 1 e 2 corroboram com Rotta Loria et al. (2015), que publicou em seu estudo numérico em areia saturada,

que o movimento do ponto nulo depende da magnitude do carregamento térmico aplicado.

Também pode ser visto na Figura 38 que o ponto nulo teve uma tendência de estabilização aproximadamente na cota de 5,70 m para a variação média de temperatura de 14.8°C. Isso pode ter ocorrido quando o sistema trocador de calor entrou no regime estacionário, onde não há mudança significativa de temperatura por ter o sistema alcançado sua máxima capacidade de troca de calor. Um aumento da capacidade da fonte de calor poderia, nesse caso, desestabilizar o sistema resultando em novo movimento do ponto nulo até sua estabilização em uma nova profundidade.

#### **4.3 - Análise do Ponto Nulo com aplicação do Modelo de Chen e McCartney (2016)**

Para ilustrar o que ocorre em relação ao movimento do ponto nulo e a reorganização das tensões no solo, o modelo de transferência de carga proposto por Chen e McCartney (2016) foi utilizado com algumas combinações de resistência lateral e de ponta. Foi considerada na aplicação do modelo uma estaca com dimensões iguais à estaca ensaiada nesta pesquisa. Três variações de temperatura foram adotadas, 2, 10 e 20°C. Na Figura 39 as linhas representam as resistências laterais arbitradas e os pontos são as cotas encontradas do ponto nulo para cada variação de temperatura e para o caso de resistência de ponta igual a zero e diferente de zero.

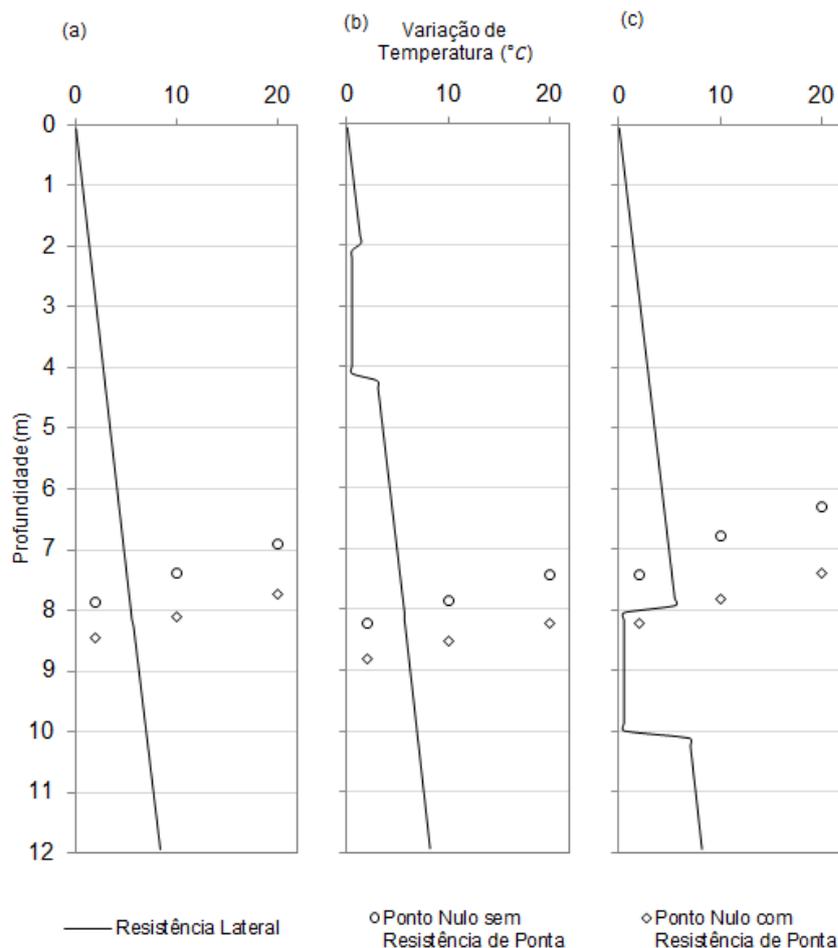


Figura 39 - Esquemas para análise da variação do ponto nulo utilizando o modelo de transferência de carga de Chen e McCartney (2016): (a) resistência crescente; (b) resistência crescente com camada pouco resistente entre 2 e 4m; (c) resistência crescente com camada pouco resistente entre 8 e 10m.

Na Figura 39a a resistência lateral cresce linearmente com a profundidade. Nota-se que os valores de ponto nulo estão abaixo da metade da estaca devido a maior resistência estar na parte de baixo. É possível notar que a adoção de resistência de ponta diferente de zero faz com que o ponto nulo esteja mais abaixo por causa do aumento de resistência na seção inferior da estaca. Esse movimento descendente do ponto nulo com o aumento da resistência de ponta foi notado em todos os casos, conforme Figuras 39b e 39c. Esse fato pode ser utilizado para explicar o movimento descendente do ponto nulo no início do ensaio, ou seja, a resistência de ponta começou a ser mobilizada trazendo o ponto nulo para baixo.

Na Figura 39b foi colocada uma camada menos resistente entre as cotas 2 e 4m. Com a diminuição da resistência na seção acima do ponto nulo, este se

movimentou para baixo permitindo o reequilíbrio entre as forças na seção superior e inferior ao ponto nulo. Na Figura 39c a camada menos resistente foi colocada abaixo do ponto nulo, este se movimentou para cima para reequilibrar as forças entre as seções separadas pelo ponto nulo.

#### **4.4 - Prova de Carga Térmica**

Como explicado no item 2.6 do capítulo 2, é possível a obtenção da curva carga-recalque de um ensaio com carregamento térmico. Uma vez que as localizações do ponto nulo são conhecidas, uma curva carga-deslocamento semelhante à apresentada na Figura 14 pode ser obtida para carregamento térmico aplicado. Conforme explicado anteriormente referenciando Knellwolf *et al.* (2011), a soma das forças mobilizadas na seção acima do ponto nulo deve ser igual a soma das forças mobilizadas abaixo do ponto nulo. Assim, calcula-se a carga térmica aplicada utilizando a Equação 2.2.3 para a tensão térmica calculada na cota do ponto nulo.

Figura 40 apresenta as cargas térmicas no ponto nulo e os respectivos deslocamentos relativos nas pontas da estaca. Pode ser observado no gráfico que o deslocamento ascendente para cada carga térmica calculada no ponto nulo não é igual ao seu respectivo deslocamento descendente. Isso demonstra que os deslocamentos relativos ao ponto nulo não precisam ser necessariamente iguais como no caso do equilíbrio de forças.

Para obter a curva ajustada de carga-recalque, valores de deslocamento são arbitrados e as forças resultantes das seções superior e inferior da estaca são calculadas por interpolação na Figura 40. Os valores são então somados e a soma é considerada a força térmica resultante aplicada à estaca.

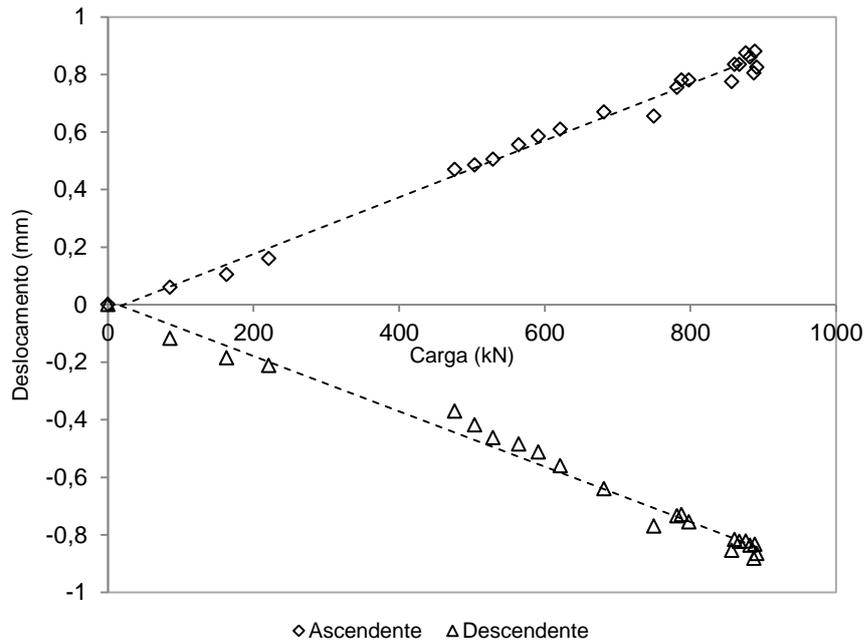


Figura 40 - Curva carga vs deslocamento de topo e base - carregamento térmico.

Figura 41 apresenta a curva ajustada carga-recalque. O carregamento térmico total ao fim do ensaio foi estimado em cerca de 1700 kN para a variação média máxima de 14,8°C. Nota-se na Figura 41 que a carga aplicada na estaca não ultrapassou a zona elástica se comparada a uma prova de carga convencional, pois o comportamento da curva se mostra linear. No entanto, pode-se lançar mão de métodos de extrapolação da curva de carga-recalque como, por exemplo, o método de van der Veen (1953) para obter uma estimativa da capacidade última da estaca.

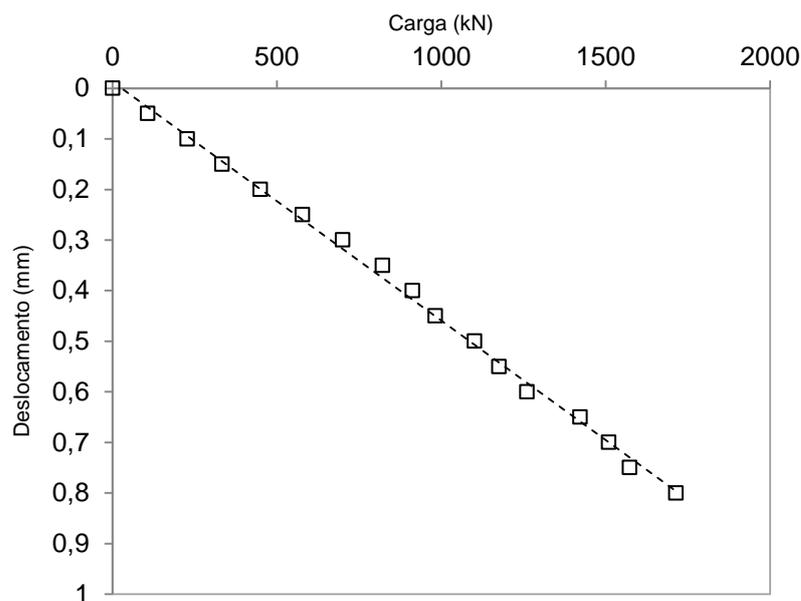


Figura 41 - Curva carga vs recalque - carregamento térmico.

#### 4.5 - Aplicação do modelo de transferência de carga

As Figuras 42 e 43 mostram os resultados obtidos de deformação e tensão térmica para as resistências de ponta calculadas pelo método de Teixeira e pelo método de Aoki-Velloso. Diferentes valores de  $\beta$ , que é um fator de redução associado ao processo de instalação da estaca, foram utilizados. Na aplicação do modelo o nível d'água foi considerado na cota de 2,5m, quando utilizado na cota de 5,75 não demonstrou diferença significativa. Os valores de deformações e tensões térmicas denominados TRT 1 referem-se ao primeiro ensaio experimental realizado por Ferreira (2017), e os denominados TRT 4 referem-se ao ensaio experimental realizado nesta pesquisa.

$$Q_{b,max} = 290 \text{ kN Teixeira}$$

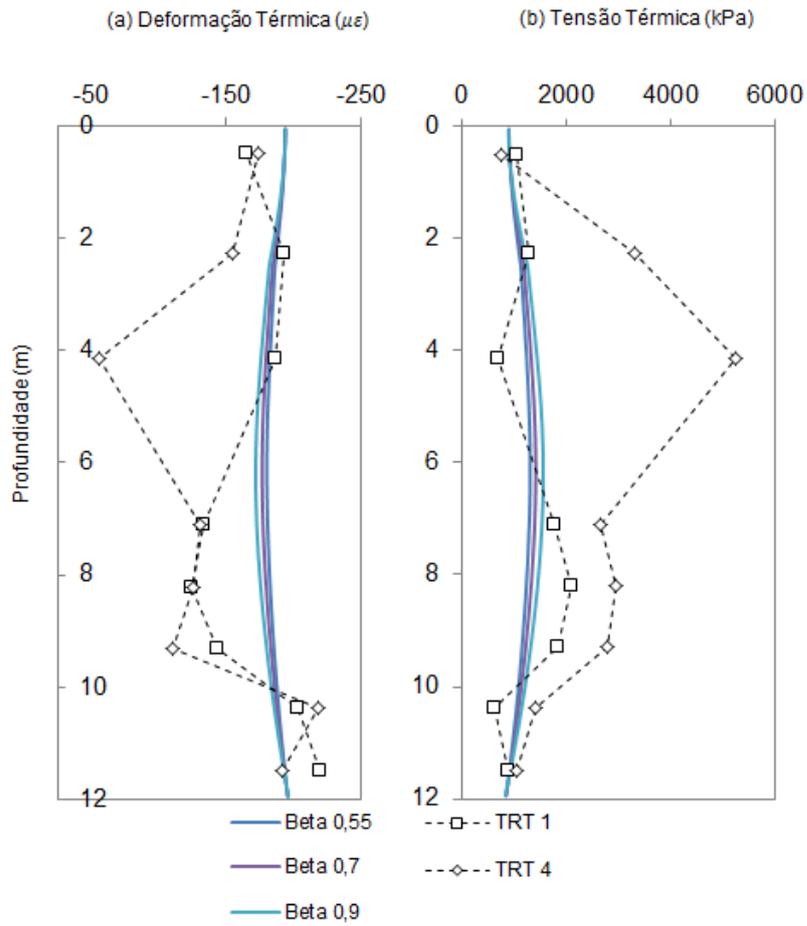


Figura 42 - Resultados da análise com o uso do modelo de Chen e McCartney (2016) com resistência de ponta calculada pelo método de Teixeira: (a) Deformação Térmica; (b) Tensão Térmica.

Entre os dois valores de resistência de ponta que foram considerados, a mais baixa resistência de ponta (Método de Teixeira) juntamente ao valor de  $\beta$  igual a 0,9 refletem melhor o comportamento do ensaio TRT 1. A rigidez da cabeça da estaca ( $K_h^1$ ) que melhor reflete o comportamento da estaca é igual a 100 MN/mm. Pequenas diferenças podem estar associadas à presença da camada de argila mole que oferece pouca resistência na cota em que está presente. Além disso, a utilização da mesma curva t-z ao longo da estaca, uma vez que, a rigidez lateral pode aumentar com a profundidade e possui inclinações diferentes a depender do tipo de solo.

$$Q_{b,max} = 653 \text{ kN Aoki-Velloso}$$

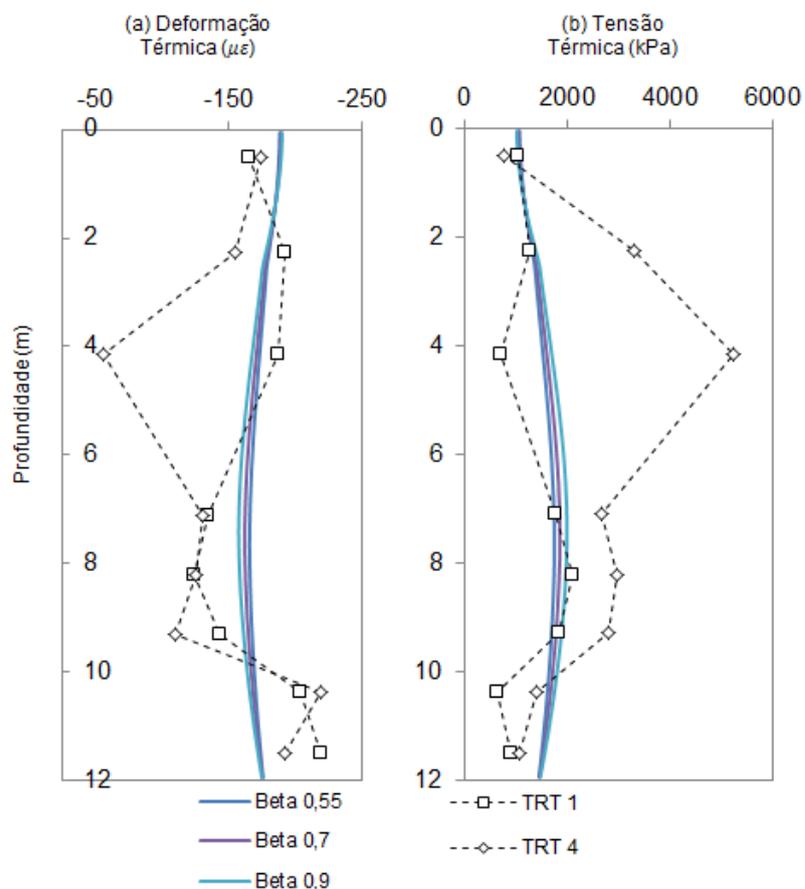


Figura 43 - Resultados da análise com o uso do modelo de Chen e McCartney (2016) com resistência de ponta calculada pelo método de Aoki-Velloso: (a) Deformação Térmica; (b) Tensão Térmica.

Os resultados experimentais realizados nesta pesquisa não demonstram concordância com o comportamento obtido na aplicação do modelo de Chen e McCartney, possivelmente devido à ocorrência de deformações plásticas no solo devido ao carregamento e descarregamento da estaca em ensaios anteriores de Ferreira (2017). Ainda, Suryatriyastuti *et al.* (2014) atenta para possibilidade de perda de adesão na interface solo-estaca devido ao carregamento cíclico, ou no caso particular da estaca geotérmica desta pesquisa, devido ao carregamento e descarregamento térmico.

A aplicação deste modelo de Chen e McCartney (2016) demonstrou poder ser aplicado para a previsão do comportamento das estacas geotérmicas quando instalados em solos estratificados mesmo quando há presença de pequenas camadas de solo coesivo. No entanto, efeitos do carregamento e descarregamento, e efeitos de carregamentos cíclicos, quando houver, não podem ser negligenciados.

Sobretudo, Bourne-Webb *et al.* (2016) aponta alguns aspectos negativos na aplicação de modelos simplificados de transferência de carga, destacando o fato de se ignorar a influência de temperatura no solo e sua consequente mudança de volume.

## 5- CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Os resultados obtidos no carregamento térmico da estaca geotérmica evidenciaram o aumento de temperatura e o surgimento de deformações e tensões termicamente induzidas em seu interior. Através das leituras dos deslocamentos da cabeça da estaca e das deformações obtidas pelos extensômetros durante o ensaio foi possível concluir que houve variação da cota do ponto nulo com a variação de temperatura. Uma vez encontrada a posição do ponto nulo e a variação de temperatura na cota, foi possível a obtenção de uma curva carga-recalque para o carregamento térmico aplicado. Além disso, a aplicação de um modelo de transferência de carga não se mostrou satisfatório, especificamente, para o ensaio realizado nesta pesquisa.

Pode-se concluir que o termopar do concreto na cota de 9,3 m que está próximo ao limite entre a camada de argila e a camada de areia registrou a menor temperatura durante todo o ensaio. Esse registro de menor temperatura leva a crer que a maior permeabilidade da camada de areia gerou maior troca de calor na cota. Pode-se notar também que a variação de temperatura no aço foi mais uniforme, devido a condutibilidade térmica do aço ser maior que a do concreto e possivelmente por ter sofrido menos interferência do solo circundante.

As maiores deformações foram registradas nas proximidades da camada de argila mole e próximas às pontas da estaca, confirmando *Amatya et al.* (2012) que solos menos resistentes exercem menor restrição as deformações da estaca. A resistência lateral mobilizada e o grau de liberdade na camada de areia, extensômetro do concreto na cota de 7,10m, não variaram significativamente confirmando a não influência da variação de temperatura em solos granulares (*Hueckel et al.*, 2009; *Loveridge et al.*, 2017).

Os deslocamentos totais da cabeça da estaca medidos foram de 0,86 e 0,90 mm para a variação média de temperatura na estaca de 14,8°C. O deslocamento total da ponta inferior foi estimado igual a 0,83 mm para mesma variação média de temperatura na estaca. Foi observada a variação da cota ponto nulo durante a variação de temperatura, confirmando a conclusão de *Rotta Loria et al.* (2015) sobre a dependência do ponto nulo em relação a variação de temperatura. Uma tendência de estabilização do ponto nulo próximo à cota de 5,7 m foi observada ao fim do

carregamento térmico, quando o sistema passou do regime transiente para o estacionário. A carga total termicamente induzida calculada foi de aproximadamente 1700 kN para a variação média de temperatura de 14,8°C.

Pode-se por fim concluir que a aplicação de modelos de transferência de carga para a previsão do comportamento de estacas geotérmicas deve levar em consideração o histórico de carregamentos térmicos. Isso significa que, efeitos de carregamento e descarregamento ou de carregamentos cíclicos térmicos podem influenciar no comportamento do solo e na sua mudança de volume, além da perda de adesão na interface solo-estaca.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de maiores cargas térmicas para obtenção de maiores deslocamentos. Recomenda-se também a aplicação de diferentes carregamentos mecânicos para que se possa analisar a variação do ponto nulo em estacas geotérmicas com restrição de topo. Além disso, recomenda-se o monitoramento contínuo da estaca geotérmica entre os carregamentos para análise de possíveis deformações permanentes.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 12131 (2006) – Estacas: Prova de carga estática;
- Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503–519.
- Bandeira Neto, L. A. (2015). Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado, 130.
- Banerjee, A., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2018). Thermo-hydro-mechanical Analysis of an Offshore Monopile Foundation Used for Geothermal Energy. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4), 2305–2329. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0464-4>
- Bourne-Webb, P., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., & Loveridge, F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 402–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.046>
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., & Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 59(3), 237–248.
- Bourne-Webb, P. J. (2013). An overview of observed thermal and thermo-mechanical response of piled energy foundations. *European Geothermal Conference 2013*, (January 2013), 1–8.
- Boudali, M., Leroueil, S., Srinivasa Murthy, B.R. (1994). Viscous behaviour of natural clays., in: 13th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. ICSMFE, New Delhi, India.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.
- Campanella, R.G., Mitchell, J.K. (1968) Influence of temperature variations on soil behavior, *J. Soil Mech. Found. Div.*

- Cekerevac, C., Laloui, L. (2004) Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 28 (2004) 209–228. doi:10.1002/nag.332.
- Chen, D., Asce, S. M., McCartney, J. S., Ph, D., & Asce, M. (2016). Parameters for Load Transfer Analysis of Energy Piles in Uniform Nonplastic Soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 1–17.
- Coyle, H. M., and Reese, L. C. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 92(2), 1–26.
- Da Silva, P. E. C. A. F. (1983) Célula expansiva hidrodinâmica: uma nova maneira de executar provas de carga. Belo Horizonte – MG.
- Da Silva, P. E. C. A. F., (1986) Célula expansiva hidrodinâmica – uma nova maneira de executar provas de carga. In VIII COBRAMSEF, v., pp.223-241. Porto Alegre, RS.
- Ennigkeit, A. & Katzenbach, R. (2001). The double use of piles as foundation and heat exchanging elements. *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Istanbul*, 893–896.
- Ferreira, M. S, (2017). Resposta Termomecânica de Estaca Geotérmica. *Disseratação de Mestrado*.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H. & Ochifuji, K. (2007). Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and Buildings* 39, No. 5, 517–524
- Hueckel, T., François, B., Laloui, L. (2009). Explaining thermal failure in saturated clays, *Geotechnique*. 59 197–212.
- Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *ASCE*, (October), 890–902.
- Laloui, L., Olgun, C. G., Sutman, M., McCartney, J. S., Coccia, C. J., Abuel-Naga, H. M., & Bowers, G. A. (2014). Issues involved with thermoactive geotechnical systems: characterization of thermomechanical soil behavior and soil-structure

- interface behavior. *DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute*, 8(2), 108–120. <https://doi.org/10.1179/1937525514Y.0000000010>
- Laloui, L., & Di Donna, A. (2011). Understanding the behaviour of energy geostructures. *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, 164(November), 184–191.
- Laloui, L., François, B. (2009). ACMEG-T: soil thermoplasticity model, *Artic. J. Eng. Mech.* doi:10.1061/ASCEEM.1943-7889.0000011.
- Laloui, L., Nuth, M. & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 30, No. 8, 763–781.
- Lhendup, T., Aye, L., & Fuller, R. J. (2014). In-situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.058>
- Loveridge, F., Low, J., & Powrie, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50(2), 158–168. <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-027>
- Mimouni, T., & Laloui, L. (2013). Towards a secure basis for the design of geothermal piles. *Acta Geotechnica*, 9(3), 355–366.
- Murphy, K. D., McCartney, J. S., & Henry, K. S. (2014). Thermo-Mechanical Characterization of a Full-Scale Energy Foundation. *From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering*, 617–628.
- Murphy, K. D., McCartney, J. S., & Henry, K. S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), 179–195.
- Olgun, C. G., Ozudogru, T. Y., & Arson, C. F. (2014). Thermo-mechanical radial expansion of heat exchanger piles and possible effects on contact pressures at pile–soil interface. *Géotechnique Letters*, 4(3), 170–178. <https://doi.org/10.1680/geolett.14.00018>

- Plaseied, N. (2012). Load transfer analysis of energy foundations. M.S. thesis, Univ. of Colorado Boulder, Boulder, CO.
- Rotta, A. F., Gunawan, A., Shi, C., Laloui, L., & Ng, C. W. W. (2015). Geomechanics for Energy and the Environment Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads, 1, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2015.03.002>
- Reese, L. C., and O'Neill, M. W. (1987), Drilled shafts: Construction procedures and design methods. Rep. FHWA-HI-88-042, U.S. DOT, Federal Highway Administration, Office of Implementation, McLean, VA.
- Souza Cruz, F. V. A., Basso, R., Bottino, C.E. (2015). Interpretação do Ensaio de prova de carga estática, realizado pelo método bidirecional.
- Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., & Burlon, S. (2014). A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles. *Computers and Geotechnics*, 55, 378–391. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.09.021>
- Sutman, M. (2016). Thermo-Mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling.
- Sutman, M., Olgun, C. G., & Brettmann, T. (2015). Full-Scale Field Testing of Energy Piles. *Ifcee*, 1638–1647.

## ANEXO I

Cliente:		<b>Fernando Saboya - UENF</b>				Furo N°	<b>SP-1</b>						
Obra:		<b>Instalações de Instrumentos - Prédio da Centrifuga</b>				Sondador	Irneu						
Nível d'água: <b>4,75m</b>		Coordenadas em UTM - 24k WGS 84			Amostrador Padrão - Diâmetro Interno 34,9mm - Diâmetro Externo 50,8mm		Data	Revestimento					
							21/06/2017	2 1/2" - 2,00m					
Amostras	Perfil das Camadas	Penetração			30cm iniciais	30cm finais	Gráfico de Números de Golpes					Mudança das Camadas	Classificação Tátil Visual dos Solos
		N° de Golpes/15cm					0 10 20 30 40 50						
0	[Perfil das Camadas]												
1		6	7	13	13	20						4,05	Aterro de materiais diversos.
2		4	5	5	9	10						5,61	Areia fina à grossa, siltosa, com mica, de cor marrom avermelhada, medianamente compacta.
3		2	3	3	5	6						8,75	Areia fina à grossa, pouco siltosa, com pedregulhos localizados, mica, de cor marrom acinzentada, medianamente compacta.
4		4	6	10	10	16						10,40	Argila siltosa, com pouca areia fina, presença de matéria orgânica, turfácea, mica, de cor preta, de consistência muito mole a mole.
5		4	4	6	8	10						12,00	Areia fina à grossa, muito siltosa, com mica, cinza escura, pouco compacta.
6		4	5	6	9	11							Limite da sondagem por determinação do cliente.
7		6	9	10	15	19							
8		8	10	13	18	23							
9		2	2	2	4	4							
10		1	1	1	2	2							
11	3	3	5	6	8								
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													

**GRÁFICO**

N° Golpes/30cm iniciais    - - - - -  
N° Golpes/30cm finais        - - - - -

**Obs.:**

MS-GEO Engenharia Ltda  
 Sôcio Administrador