



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Felipy Lima de Queiroz

**AVALIAÇÃO DE INSTALAÇÃO E DESEMPENHO EM TERRENO
ARENOSO DE UMA ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA**

Natal

2018

Felipy Lima de Queiroz

**AVALIAÇÃO DE INSTALAÇÃO E DESEMPENHO EM TERRENO
ARENOSO DE UMA ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

Natal

2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Queiroz, Felipy Lima de.

Avaliação de instalação e desempenho em terreno arenoso de uma estaca helicoidal instrumentada / Felipy Lima de Queiroz. - 2018.

72 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa.

1. Estaca helicoidal - Dissertação. 2. Estaca instrumentada - Dissertação. 3. Prova de carga à tração - Dissertação. 4. Penetrômetro dinâmico de cone (DCP) - Dissertação. 5. Radar de penetração de solo (GPR) - Dissertação. I. Costa, Yuri Daniel Jatobá. II. Título.

FELIPY LIMA DE QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE INSTALAÇÃO E DESEMPENHO EM TERRENO
ARENOSO DE UMA ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. José Neres Da Silva Filho Queiroz – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Jonh Eloi Bezerra – Examinador Externo à Instituição (UFERSA)

Natal/RN, 31 de julho de 2018.

Dedicado à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À Deus por seu infinito amor e misericórdia.

À minha mãe, Elione Correia de Lima Queiroz pelo apoio, incentivo e amor incondicional.

Ao meu orientador, Professor Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa, pelos ensinamentos, conselhos, paciência e encorajamento.

Aos meus amigos João Paulo, Gustavo Figueiredo e Alex Dantas por todo o apoio e incentivo em diversos momentos importantes deste trabalho.

Aos amigos Pedro, Graciane, Ray, Eduardo, Luiz, pelo grande apoio na execução das provas de carga e calibração da estaca.

À empresa Geoquality Geotecnia Ltda, em nome de Avelino, pelo fornecimento de material na execução das provas de carga e calibração da estaca.

Ao engenheiro Floriano, pelo apoio na utilização da perfuratriz para instalação e remoção da estaca helicoidal no campo experimental.

Ao Professor Lúcio, coordenador da oficina mecânica da UFRN, pelo apoio na preparação da estaca para a instrumentação.

Ao Laboratório de Análises Estratigráficas da UFRN, pela aquisição e processamento dos dados do GPR.

Ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto e concessão de bolsa.

À banca examinadora deste trabalho, por aceitar o convite disponibilizando o seu tempo para contribuir com o este trabalho.

AVALIAÇÃO DE INSTALAÇÃO E DESEMPENHO EM TERRENO ARENOSO DE UMA ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA

Felipy Lima de Queiroz

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

RESUMO

Estacas helicoidais são fundações usadas para resistir a carregamentos de compressão, de tração ou laterais. Dentre as diversas vantagens em relação a outros tipos de estaca, destacam-se a possibilidade de serem carregadas logo após sua instalação, a alta produtividade e a possibilidade de reutilização. Apesar do crescente emprego, o volume de dados de experimentos de campo com estacas helicoidais instrumentadas ainda é relativamente pequeno. Neste trabalho, é avaliado o comportamento a esforço de tração de uma estaca helicoidal instrumentada em solo arenoso, bem como o efeito de perturbação no terreno causado por sua instalação. A estaca, dotada de três hélices, recebeu instrumentação por extensômetros elétricos de resistência em cinco seções distintas ao longo do fuste. Duas seções foram dedicadas à medição de torque e as outras três, à obtenção de esforço axial. O desempenho da estaca instrumentada foi monitorado durante a instalação através da medição do torque de cravação. Duas provas de carga estática à tração foram realizadas para medição dos esforços axiais nas seções instrumentadas. A perturbação que a instalação causou no solo circundante foi avaliada por meio de ensaios com um penetrômetro dinâmico de cone (DCP) e aquisições de radargramas, usando um radar de penetração de solo (GPR). Os resultados da instrumentação mostraram que a contribuição à resistência proveniente da hélice de topo é menor do que a das hélices intermediária e de ponta. Os resultados do DCP e do GPR sugerem que a passagem das hélices durante a instalação da estaca tornou o solo menos compacto dentro de uma zona de influência, a partir do fuste, equivalente a aproximadamente três vezes o diâmetro da maior hélice.

Palavras-chave: Estaca helicoidal, estaca instrumentada, prova de carga à tração, DCP, GPR.

EVALUATION OF INSTALLATION AND PERFORMANCE OF AN INSTRUMENTED HELICAL PILE IN A SANDY SOIL DEPOSIT

Felipy Lima de Queiroz

Advisor: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

ABSTRACT

Helical piles are foundation types used to support compressive, tensile, or lateral loading. The capability of being loaded right after installation, the high production rate and the possibility of reutilization in different projects are a few advantages of helical piles. Despite the increasing use of helical pipes, the amount of data collected from field experiments with instrumented helical piles is still relatively small. In this work, the tensile behavior of an instrumented helical pile embedded in a sandy soil deposit is evaluated along the effect of disturbance caused in the ground after installation. The three-plate pile used in this investigation was instrumented with electric resistance strain gages attached to five distinct sections along its shaft. Two sections were used for measuring torque and the other three sections were used for measuring axial load. The performance of the instrumented pile was monitored during installation by measurements of the installation torque. The axial load in the instrumented sections was monitored during two static pullout tests. The disturbance caused by pile installation was evaluated with the results of tests with a dynamic cone penetrometer (DCP) and by radargram renderings from a ground penetration radar (GPR). Results from the instrumented sections showed that the contribution of the top helical plate in the overall bearing capacity is smaller than that of the intermediate and bottom plates. Results from the DCP and the GPR devices suggest that the passage of the helical plates during pile installation reduced soil compaction within a zone of influence from the shaft of approximately three times the diameter of the largest plate.

Keywords: Helical pile, instrumented pile, pullout load test, DCP, GPR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Elementos da estaca helicoidal (adaptado Perko, 2009).....	5
Figura 2.2 – Modelo inteiro do Farol Maplin Sands patenteado por Alexander Mitchell (Science Museum Group Collection, 2018).....	6
Figura 2.3 – Aplicações das estacas helicoidais: (a) residências; (b) edificações comerciais; (c) painel solar; (d) aerogeradores; (e) estrutura de contenção; (f) reforços de fundação (Geotechnical, 2018; Aegrupo, 2018).....	8
Figura 2.4 – Adaptação de um motor hidráulico em uma retroescavadeira (Perko, 2009).....	10
Figura 2.5 – Representação de hipótese de perturbação da areia causada pela passagem de três hélices durante a instalação para areia fofa e areia compacta (adaptado de Tsuha <i>et al.</i> 2012).....	13
Figura 2.6 – Ruptura pelo método do cisalhamento cilíndrico (Hoyt e Clemence, 1989).....	17
Figura 2.7 – Superfície de ruptura pelo método do cisalhamento cilíndrico na condição de ancoragem rasa para um solo arenoso (Das, 1990).....	18
Figura 2.8 – Superfície de ruptura idealizada do método do cisalhamento cilíndrico na condição de ancoragem rasa para um solo arenoso (Das, 1990)....	19
Figura 2.9 – Variação de K_u em relação a H_1/D_1 e ϕ (Das, 1990).....	21
Figura 2.10 – Esquema de ruptura localizada (adaptado de Hoyt, 1989).....	21
Figura 2.11 – Gráfico que relaciona o fator de capacidade de carga com o ângulo de atrito interno para solos arenosos (adaptado de A. B. Chance Co., 2014).....	22
Figura 2.12 – Representação do Método de Davisson (1972) para determinação da carga última na curva de uma prova de carga (adaptado de Perko, 2009).....	23
Figura 3.1 – Representação do campo experimental (adaptado de Costa, 2017a).....	25
Figura 3.2 – Vista geral do terreno do campo experimental.....	25
Figura 3.3 – Seção típica da geologia da cidade de Natal (Gusmão Filho, 1982)..	26
Figura 3.4 – Perfil do solo obtido do furo SP02 (Costa, 2017b).....	26
Figura 3.5 – Vista lateral de um corte após conclusão da última prova de carga.....	27
Figura 3.6 – Segmentos da estaca e localização das seções instrumentadas: (a) seção guia; (b) seção de extensão com hélice; (c) seção de extensão simples; dimensões em milímetro; sem escala.....	29
Figura 3.7 – Detalhe do extensômetro utilizado (Excel Sensores, 2016).....	30
Figura 3.8 – Preparação da superfície: (a) soldagem dos anéis; (b) rasgo na parte superior do segmento; (c) lixamento grosso; (d) utilização da lixa Nº 60; (e) lixamento fino.....	31
Figura 3.9 – Colagem dos extensômetros e passagem dos cabos: (a) colagem dos extensômetros; (b) passagem dos cabos; (c) colocação da fita isolante.....	33
Figura 3.10 – Montagem do circuito: (a) e (b) ligação dos fios aos terminais; (c) ligação na porta serial.....	34

Figura 3.11 – Proteção: (a) resina de silicone RK e abraçadeiras; (b) fita isolante autofusão; (c) luva metálica e resina epóxi.....	35
Figura 3.12 – Vista superior do esquema da montagem para calibração da instrumentação.....	36
Figura 3.13 – Ensaio de calibração em execução.....	36
Figura 3.14 – Instalação da estaca.....	37
Figura 3.15 – Montagem da prova de carga: (a) posicionamento das vigas de reação; (b) sistema de aquisição de dados; (c) relógios comparadores.....	39
Figura 3.16 – Posição dos dados coletados com o DCP (Costa, 2017a).....	41
Figura 3.17 – Execução do ensaio DCP.....	42
Figura 3.18 – Esquema da aquisição de dados com o GPR em torno da estaca na posição C.....	43
Figura 3.19 – Aquisição de dados com o GPR.....	44
Figura 3.20 – Tensiômetros instalados no campo experimental.....	45
Figura 4.1 – Gráfico de calibração da S2.....	46
Figura 4.2 – Gráfico de calibração da S3.....	47
Figura 4.3 – Gráfico de calibração da S5.....	47
Figura 4.4 – Exumação após ensaio B.....	49
Figura 4.5 – Razão entre nº de golpes pré-instalação e pós instalação em função da distância do eixo da estaca.....	51
Figura 4.6 – (a) Radagrama referente ao perfil 7 (adaptado de Lima Filho, 2017); (b) detalhe ampliado da zona perturbada.....	53
Figura 4.7 – Torque de instalação na Posição B.....	54
Figura 4.8 – Torque de instalação na Posição C.....	55
Figura 4.9 – Torque de instalação na Posição D.....	55
Figura 4.10 – Curva carga-deslocamento do Ensaio A.....	57
Figura 4.11 – Curva carga-deslocamento do Ensaio B.....	57
Figura 4.12 – Envoltórias de carga-deslocamento dos Ensaios A e C.....	59
Figura 4.13 – Curvas de carga-tempo-deslocamento da instrumentação do Ensaio A.....	61
Figura 4.14 – Curvas de carga-tempo-deslocamento da instrumentação do Ensaio B.....	61
Figura 4.15 – Envoltórias de carga-deslocamento da instrumentação do Ensaio A.....	62
Figura 4.16 – Envoltórias de carga-deslocamento da instrumentação do Ensaio B.....	62
Figura 4.17 – Diagrama de transferência de carga para o Ensaio A.....	63
Figura 4.18 – Diagrama de transferência de carga para o Ensaio B.....	63
Figura 4.19 – Diagrama de atrito lateral nos Ensaio A e B.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de $(H_1/D_1)_{cr}$ em função do ângulo de atrito (Das, 1990).....	15
Tabela 2.2 – Valores de K_u para alguns ângulos de atrito do solo (Mitsch e Clemence, 1985).....	20
Tabela 3.1 – Sequência e características das provas de carga.....	41
Tabela 4.1 – Profundidade das hélices após instalação.....	48
Tabela 4.2 – Profundidade das seções instrumentadas após instalação.....	48
Tabela 4.3 – Valores de número de golpes no ensaio com DCP pré-instalação e pós-instalação da estaca.....	50
Tabela 4.4 – Torques representativos de instalação, total e parcelas obtidas pela instrumentação (kNm).....	56
Tabela 4.5 – Capacidade de carga da estaca helicoidal Q_u	59
Tabela 4.6 – Resultados de campo e capacidades de carga estimadas.....	60
Tabela 4.7 – Capacidades de carga total e parcelas obtidas com a instrumentação (valores em kN).....	64
Tabela 4.8 – Fatores de torque (K_T), em m^{-1}	66

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.2 Escopo e organização do trabalho	2
CAPÍTULO 2	4
Revisão da literatura	4
2.1 Definições e terminologias	4
2.2 Histórico da estaca helicoidal	5
2.3 Aplicações de estacas helicoidais	7
2.4 Vantagens sobre outros sistemas de fundações	7
2.5 Instalação	9
2.5.1 Procedimentos gerais	9
2.5.2 Efeito da perturbação da instalação	12
2.6 Efeito da profundidade de instalação e da configuração das hélices na forma de ruptura	14
2.6.1 Influência do embutimento relativo das hélices	14
2.6.2 Influência do espaçamento relativo entre hélices	15
2.7 Métodos de previsão de capacidade de carga	16
2.7.1 Método do cilindro de cisalhamento	16
2.7.2 Condição de ancoragem rasa	17
2.7.3 Métodos das capacidades de carga individuais	21
2.8 Interpretação da curva de prova de carga à tração pelo Método de Davisson (1972)	23
CAPÍTULO 3	24
Materiais e métodos	24
3.2 Características geológicas do local	24
3.3 Características geotécnicas do local da pesquisa	26
3.4 Instrumentação da estaca	28
3.4.1 Preparação da estaca	30
3.4.1.1 Preparação da superfície	30
3.4.1.2 Colagem dos extensômetros e passagem dos cabos	32
3.4.1.3 Ligação dos fios	33
3.4.1.4 Proteção	34
3.4.2 Calibração das seções instrumentadas para esforço axial	35
3.5 Instalação da estaca	37

3.6 Montagem da prova de carga.....	38
3.7 Execução das provas de carga.....	40
3.7.1 Provas de carga à tração.....	40
3.7.2 Resumo dos ensaios.....	40
3.8 Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)	41
3.9 Radar de Penetração do Solo (GPR).....	42
3.10 Monitoramento da sucção matricial do solo.....	44
CAPÍTULO 4	46
Resultados e Discussões	46
4.1 Resultados da calibração das seções instrumentadas	46
4.2 Processo de instalação.....	48
4.3 Exumação da estaca após prova de carga.....	49
4.4 Considerações sobre a perturbação no solo causada pela instalação da estaca.....	50
4.4.1. Resultados dos ensaios com o Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)	50
4.4.2 Resultados dos ensaios com radar de penetração do solo (GPR)	52
4.5 Medições do torque de instalação da estaca helicoidal.....	54
4.6 Resultados das provas de Carga Estática	56
4.7 Previsão da capacidade de carga à tração.....	59
4.8 Resultados da instrumentação para medições de carga axial.....	60
4.8.1 Diagramas de transferência de carga	63
4.8.2 Desenvolvimento do atrito lateral	65
4.9 Valores do fator de torque (K_T) das estacas instrumentadas	66
CAPÍTULO 5	68
Conclusões.....	68
5.1 Sugestões para pesquisas futuras.....	69
Referências Bibliográficas	70

CAPÍTULO 1

Introdução

Estaca helicoidal é um sistema de fundação composto por uma haste metálica central com chapas helicoidais de aço soldadas. Seu processo de instalação se dá a partir da aplicação de torque durante o processo de cravação da estaca. As estacas helicoidais são projetadas para resistir a carregamentos laterais, de compressão e de tração.

As ancoragens helicoidais apresentam diversas vantagens, tais como facilidade e rapidez na instalação, inexistência de vibrações durante a instalação, controle de qualidade simples e elas podem ser reutilizadas várias vezes a depender do tipo de emprego. Além disso, diferentemente das estacas de concreto, as estacas helicoidais podem ser carregadas logo após sua instalação.

Embora exista na literatura internacional diversas pesquisas sobre esse tipo de fundação, no Brasil a pesquisa sobre estacas helicoidais ainda é limitada, apesar de seu uso vir crescendo nos últimos anos. Portanto, se faz necessário um melhor entendimento do comportamento desse tipo de fundação empregado em depósitos de areia pura, tipo este de solo bastante comum em algumas regiões do nordeste brasileiro.

Escassez de dados na literatura técnica de estacas do gênero instrumentadas e pesquisas insuficientes quanto à instalação e desempenho de estacas helicoidais utilizadas em solos granulares são as principais razões que motivaram esta pesquisa.

1.1 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o processo de instalação, em um solo composto por camadas de areia pura, e o desempenho à tração de uma estaca

helicoidal munida de instrumentação para medição de torque de instalação e esforços axiais.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar o comportamento da estaca helicoidal através de provas de carga à tração realizadas em depósito de areia pura;
- Comparar os resultados experimentais das provas de carga com os métodos de previsão de capacidade de carga propostos na literatura;
- Verificar a distribuição de torque desenvolvido ao longo da estaca durante a instalação, por meio do desenvolvimento e implantação na estaca de instrumentação por extensômetros elétricos de resistência, para o registro de torque.
- Verificar a distribuição de esforço normal desenvolvido ao longo da estaca durante as provas de carga, por meio do desenvolvimento e implantação na estaca de instrumentação por extensômetros elétricos de resistência, para o registro de medidas de esforço axial.
- Verificar a perturbação no solo causada pelo processo de instalação da estaca através de ensaios com o Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) e o Radar de Penetração do Solo (GPR);

1.2 Escopo e organização do trabalho

Essa pesquisa está estruturada em cinco capítulos:

- Este capítulo 1 apresentou o contexto em que a pesquisa foi concebida e os objetivos da pesquisa;
- O capítulo 2 contém a revisão da literatura relacionado ao uso, projeto e ensaios da estaca helicoidal. Inicialmente, são definidos os conceitos e terminologias das ancoragens helicoidais. Em seguida, apresenta-se um breve histórico da estaca helicoidal, aplicações modernas e vantagens sobre outros tipos de fundação. Depois são apresentadas algumas práticas construtivas e efeitos causados pela instalação, e por fim os métodos de previsão de capacidade de carga;

- O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos usados na pesquisa. Começa com a descrição do local da pesquisa e inclui uma breve caracterização geológica e geotécnica do campo experimental onde foram realizados os ensaios de campo. Após isso, todo o processo de instrumentação da estaca é detalhado. Por fim, são descritos o processo de instalação da estaca helicoidal, bem como as provas de carga, os ensaios com o Penetrômetro Dinâmico de Cone e o Radar de Penetração do Solo;
- O capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos ensaios de campo;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

Revisão da literatura

2.1 Definições e terminologias

Segundo Prasad e Narasimha Rao (1996), as estacas helicoidais, também chamadas de ancoragens helicoidais quando submetidas a esforços de tração, consistem em uma ou mais placas circulares em forma helicoidal soldadas a um eixo central de aço, com espaçamento específico. Elas são aparafusadas no solo no momento da instalação pela aplicação de um torque no topo da haste através de um motor hidráulico.

De acordo com Perko (2009), os componentes básicos de uma estaca helicoidal incluem uma seção guia, seções de extensão, hélices e um suporte, como mostrado na Figura 2.1. A seção guia tem uma ponta afunilada, podendo apresentar uma ou múltiplas hélices, e é a primeira a entrar no solo. As seções de extensão são usadas para aumento de profundidade, e são conectadas à estaca durante a instalação no solo até que as hélices atinjam o estrato de solo requerido.

Pode-se utilizar também seções de extensões com hélices, mas, geralmente, elas são compostas apenas de uma haste central e acoplamentos. Os acoplamentos entre as seções são do tipo ponta e bolsa, utilizando-se de parafusos e porcas.

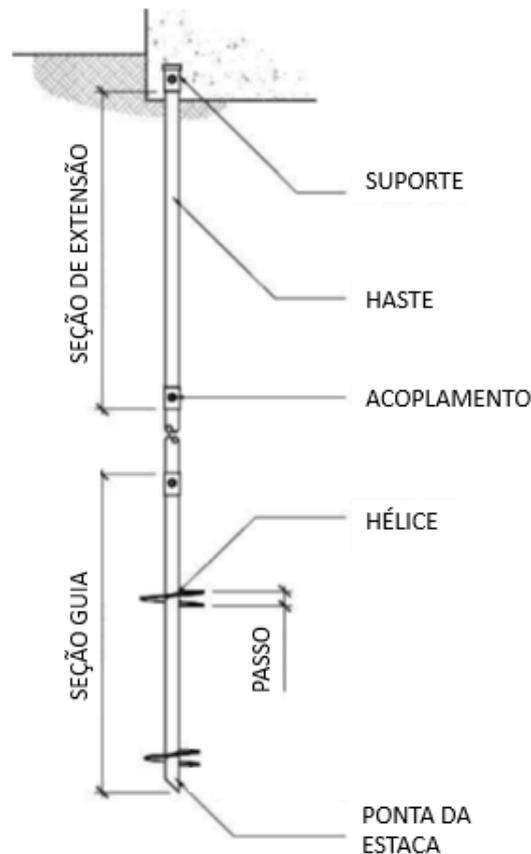


Figura 2.1 – Elementos da estaca helicoidal (adaptado de Perko, 2009).

2.2 Histórico da estaca helicoidal

Alguns dos mais importantes momentos da história da estaca helicoidal são relatados por Perko (2009). A patente sobre a invenção de estacas helicoidais foi arquivada em 1833, em Londres, por Alexander Mitchell, um fabricante de tijolos, cego e engenheiro civil. Alexander Mitchell chamou o dispositivo de estaca parafuso e seus primeiros usos foram para amarração de navios.

Os faróis foram as primeiras construções onde as estacas helicoidais foram usadas como elementos de fundação. O farol Maplin Sands, localizado em uma região de solo instável perto do estuário do Tamisa, foi construído utilizando estaca helicoidal com elemento de fundação, como ilustrado na Figura 2.2. A invenção das estacas helicoidais permitiu a construção de faróis em lugares anteriormente inacessíveis. Em 1853, Eugenius Birch adotou a tecnologia de Mitchell para apoiar os cais marítimos em toda a Inglaterra. Durante a expansão do Império Britânico, estacas helicoidais foram usadas para construir novas pontes em muitos países. Da década de 1850 até

a década de 1890, estacas helicoidais foram usadas como fundações em mais de 100 faróis ao longo da costa leste dos Estados Unidos e ao longo do Golfo do México.

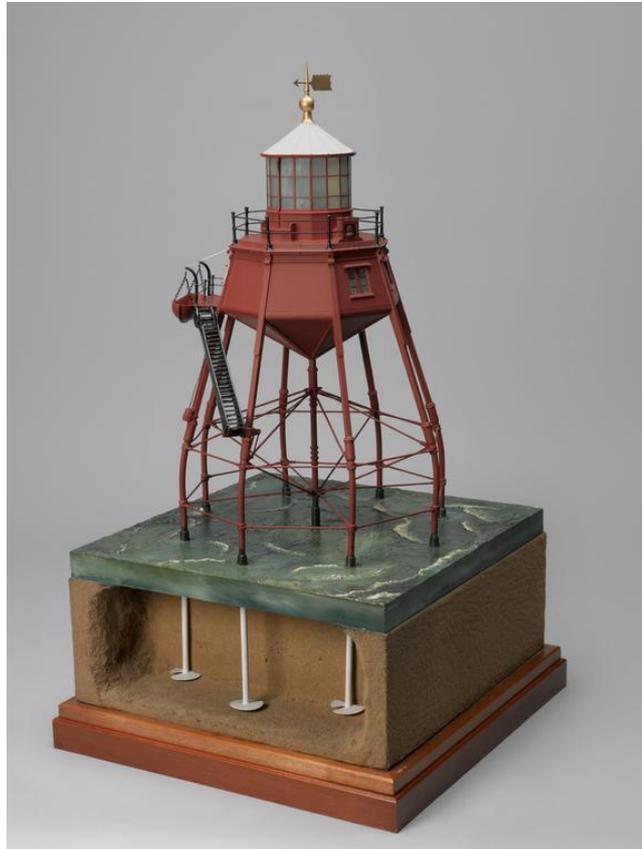


Figura 2.2 – Modelo inteiro do Farol Maplin Sands patenteado por Alexander Mitchell (Science Museum Group Collection, 2018).

Perko (2009) também informa que o uso de estacas helicoidais declinou no período de 1900 a 1950, quando ocorreram grandes desenvolvimentos em equipamentos de estacas cravadas e escavadas, inaugurando uma era de novos tipos de fundações profundas, como fundações de Raymond e estaca Franki. A estaca helicoidal moderna resultou do desenvolvimento de motores de torque hidráulicos modernos, avanços na fabricação e novas técnicas de galvanização, com seu uso focado em aplicações de ancoragem. A primeira aplicação de compressão de estacas helicoidais nos EUA foi projetada pelo engenheiro Stan Rupiper em 1980.

Segundo Tsuha (2007), a utilização de estacas helicoidais no Brasil teve início no final da última década do século XX, para resistir esforços de tração em obras de torres de linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações.

2.3 Aplicações de estacas helicoidais

Vários autores relataram a diversidade de estruturas onde as estacas helicoidais podem ser aplicadas (Sakr, 2009; Perko, 2009; Clemence e Lutenegger, 2015). As estacas helicoidais podem resistir a cargas compressivas, de tração e laterais. Elas podem ser instaladas em qualquer ângulo para melhorar sua capacidade contra cargas inclinadas. As aplicações em todo o mundo incluem fundações para casas, edifícios comerciais, painel solar e aerogeradores. Elas podem ser usadas como elementos subjacentes de reforço de fundações falhadas ou para aumentar a capacidade de suportar cargas adicionais. Como elementos de tração, as estacas helicoidais são usadas para sistemas de muros de contenção, âncoras para controle de flutuação de tubulação, torres de transmissão e muitas outras estruturas. A Figura 2.3 ilustra algumas aplicações das estacas helicoidais.

A principal aplicação de estacas helicoidais no Brasil é em torres de transmissão (Schiavon, 2016). Esse tipo de estrutura está sujeito a ciclos de carga e descarga de amplitudes variadas, principalmente devido a mudanças ambientais de vento e temperatura. Conseqüentemente, esses carregamentos cíclicos modificam as condições de tensão na massa de solo próximo à estaca, alterando assim as capacidades de carga de tração e compressão da estaca helicoidal.

2.4 Vantagens sobre outros sistemas de fundações

Segundo Sakr (2009), o uso de estacas helicoidais como fundações apresentam diversas vantagens:

- Rápida velocidade de instalação (10 m de estaca helicoidal podem ser instalados em cerca de 3 minutos);
- Facilidade de instalação em condições de acesso limitado;
- Facilidade de instalação em condições de solo congelado;
- Boa relação custo/eficácia;
- Comprimento ilimitado em vista que se pode atingir a camada de solo competente por meio da adição de segmentos de extensão;
- É um processo livre de vibrações, o que é favorável em áreas urbanas.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 2.3 – Aplicações das estacas helicoidais: (a) residências; (b) edificações comerciais; (c) painel solar; (d) aerogeradores; (e) estrutura de contenção; (f) reforços de fundação (Geotechnical, 2018; Aegrupo, 2018).

De acordo com Perko (2009), as principais vantagens das estacas helicoidais em relação a outros tipos de fundações são:

- Resistência ao solapamento em obras de pontes;
- Podem ser removidas e reaproveitadas em aplicações temporárias;
- São facilmente transportadas para locais de difícil acesso;
- A capacidade de carga da fundação pode ser obtida por meio de correlações com o torque de instalação;

- Podem ser instaladas em solo com presença do lençol freático sem a necessidade de rebaixamento;
- Geralmente precisam de menos tempo de instalação;
- Podem ser instaladas inclinadas para o aumento da resistência lateral;
- Em áreas de difícil acesso, são usados equipamentos menores para sua instalação;
- Baixos níveis de ruído e vibrações mínimas no momento da sua instalação;
- Podem ser galvanizadas para resistirem à corrosão;
- Elimina o tempo de cura e a remoção das formas do concreto;
- Elimina a necessidade de bota-fora após a instalação;
- Podem ser carregadas imediatamente após a sua instalação;
- Menor perturbação em locais ambientalmente sensíveis.

2.5 Instalação

2.5.1 Procedimentos gerais

Os procedimentos descritos resumidamente neste item são detalhados por Perko (2009). A instalação de estacas helicoidais é simples, mas requer equipamentos e procedimentos adequados, de modo que resultados consistentes possam ser alcançados. As estacas helicoidais são instaladas no solo pela aplicação de um torque no topo do fuste por meio de equipamentos dotados de sistema hidráulico como retroescavadeiras, escavadeiras hidráulicas ou caminhões, onde é acoplado um motor de torque hidráulico (Figura 2.4). O motor de torque comumente usado para instalação de estacas helicoidais produz um torque de 6 a 10 kN.m, ou superior. O motor de torque deve ter capacidade de rotação no sentido horário e anti-horário e deve ser ajustável em relação às revoluções por minuto durante a instalação.

O equipamento hidráulico deve ser capaz de aplicar força vertical e torque simultaneamente para assegurar o avanço normal da estaca helicoidal. A conexão entre o motor de torque e a estaca helicoidal deve ser em linha, reta e rígida, e deve consistir em um suporte hexagonal, quadrado ou redondo.

Um aspecto conveniente das estacas helicoidais é que sua capacidade de carga pode ser verificada a partir do torque de instalação através de métodos

empíricos. Um indicador de torque deve ser usado para medir o torque durante a instalação.



Figura 2.4 – Adaptação de um motor hidráulico em uma retroscavadeira (Perko, 2009).

As etapas de execução da estaca helicoidal são (Perko, 2009):

- Montar o equipamento acoplado-se a seção guia ao sistema de aplicação de torque, posicionando e alinhando a seção guia no local com inclinação desejada;
- Introduzir a ponta da seção guia no solo e ajustar a sua posição;
- Iniciar a rotação da estaca aplicando uma força para baixo simultaneamente. As seções devem avançar no solo de maneira contínua, a uma taxa de rotação normalmente inferior a 30 rpm;
- Verificar a inclinação da estaca sempre que necessário e anotar a profundidade e o torque de instalação para os intervalos desejados;

- Parar a instalação acima do terreno onde o operador possa ver claramente o pino de acoplamento;
- Adicionar as hastes extensoras até que a profundidade ou o torque de instalação necessários sejam alcançados;
- Cortar o fuste até a elevação de projeto;
- Perfurar buracos dos parafusos na extremidade do fuste para permitir a montagem da cabeça da estaca. Por fim, deve-se anotar a profundidade e torque final.

Segundo Perko (2009), uma força axial constante para baixo é necessária para garantir o avanço da estaca helicoidal no terreno. A condição ideal é quando essa força é suficiente para fazer com que a estaca avance um passo para cada rotação completa da estaca durante a instalação. Caso seja aplicado força insuficiente, isso pode resultar em um efeito de tradagem, causando diminuição da capacidade de carga do sistema de fundação.

Não se deve aplicar um valor de torque superior ao máximo que pode ser resistido pelos componentes e acoplamentos da estaca. Caso o torque máximo ocorra antes que a ponta da estaca alcance a profundidade mínima definida em projeto, Perko (2009) sugere as seguintes ações:

- Remover a estaca helicoidal e reinstalar uma nova com componentes mais resistentes e/ou hélices com diâmetros menores.
- Remover a estaca helicoidal e fazer um pequeno furo guia no mesmo local a reinstalar a estaca.
- Se a obstrução é rasa, retirar a estaca helicoidal e escavar para removê-la.
- Remover a estaca e realocá-la próxima ao local de instalação.
- Terminar a instalação na profundidade obtida e reavaliar a capacidade e funcionalidade da estaca. A instalação de estacas helicoidais extras pode ser necessária.
- Remover a estaca e retirar a hélice na extremidade superior e/ou reduzir o seu diâmetro cortando-a *in loco*. Reinstalar a estaca com configuração das hélices revisadas.

O valor de torque final de instalação é definido no projeto por ser diretamente proporcional à capacidade de carga da fundação por estaca helicoidal mediante uso de correlações empíricas. Caso ele não seja alcançado até a profundidade da instalação calculada em projeto (para atender a capacidade de carga desejada), podem ser adotadas as seguintes soluções, segundo Perko (2009):

- Continuar a instalação adicionando mais hastes extensoras.
- Adicionar hastes extensoras com hélices, com a finalidade de aumentar o torque e a capacidade de carga.
- Remover a estaca e instalar uma nova com mais hélices e/ou maior diâmetro.
- Diminuir a capacidade de carga da estaca. Compensar a diferença instalando-se outras estacas.

Em aplicações de tração, Livneh e El Naggar (2008) recomendam que o espaçamento de centro para centro entre duas estacas helicoidais adjacentes deve ser uma distância mínima de cinco vezes o diâmetro da maior hélice para evitar a interação entre as estacas helicoidais e garantir que a capacidade de cada estaca seja totalmente mobilizada.

2.5.2 Efeito da perturbação da instalação

Schiavon (2016) observou que os procedimentos de instalação e ensaios causam o deslocamento das partículas de areia. Imagens de microtomografias das amostras mostraram que a instalação da hélice resulta numa zona cilíndrica de material perturbado, provocando uma diminuição da densidade. Após aplicação de carga de tração, observou-se que a resposta da estaca depende das propriedades do solo perturbado logo acima da hélice.

Tshuha *et al.* (2012) estudaram como o número de hélice influencia a capacidade de carga à tração e observou que, embora a capacidade de carga geralmente aumenta com o número de hélices, ela também é afetada pela densidade da areia. Esses autores sugerem que em areias fofas (baixa densidade), a penetração da primeira hélice é responsável pelo afofamento total das partículas, e a passagem das outras hélices não causam diminuição da densidade relativa. Por outro lado, areias com alto grau de compacidade apresentam redução da densidade relativa pela

passagem da primeira hélice e a passagem de outras hélices provocam reduções adicionais da densidade relativa. A Figura 2.5 ilustra essas constatações.

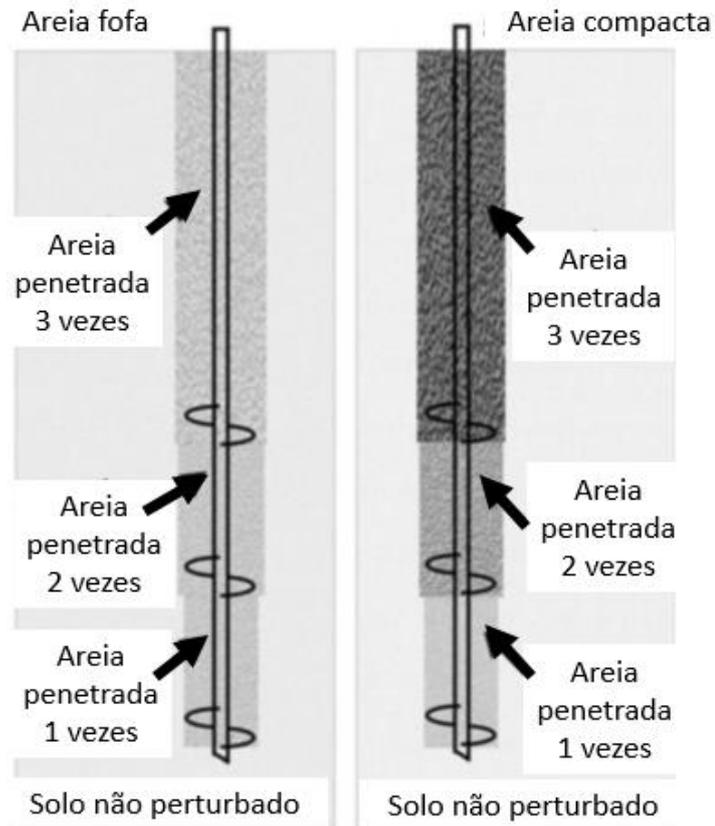


Figura 2.5 – Representação de hipótese de perturbação da areia causada pela passagem de três hélices durante a instalação para areia fofa e areia compacta (adaptado de Tsuha *et al.* 2012).

Lutenegger *et al.* (2014) propôs quantificar o grau de perturbação causado pela instalação da estaca usando um Fator de Perturbação de Instalação, indicado como a razão entre o número de revoluções por unidade de avanço medido e ideal. Segundo o autor, uma instalação de alta qualidade é quando a estaca avança a distância de um passo por cada revolução completa, correspondendo a um Fator de Perturbação de Instalação igual a 1. Baixa qualidade de instalação apresenta valores de 4 a 5. A situação ideal é quando cada hélice corta apenas uma única vez o solo.

2.6 Efeito da profundidade de instalação e da configuração das hélices na forma de ruptura

Existem duas condições em que as estacas helicoidais podem ser encontradas, são elas: condição de ancoragem rasa e condição de ancoragem profunda. Para cada uma dessas duas situações ocorrerá um comportamento típico da superfície de ruptura acima da hélice de topo da estaca.

Além disso, o espaçamento relativo entre as hélices exercerá influência no mecanismo de ruptura da fundação, podendo resultar em dois tipos de ruptura. Das (1990), Perko (2009) e o manual A. B. Chance Co. (2014) consideram os seguintes tipos de ruptura: ruptura geral e ruptura individual.

2.6.1 Influência do embutimento relativo das hélices

Mitsch e Clemence (1985) estudaram o comportamento da superfície de ruptura do solo em torno de estacas helicoidais e observaram que para uma pequena relação H_1/D_1 (razão entre a profundidade de instalação e o diâmetro da hélice de topo) a superfície de ruptura acima da hélice de topo atingia a superfície do terreno.

A partir da relação H_1/D_1 é possível separar o comportamento da ruptura de ancoragens helicoidais em rasas e profundas. Define-se como razão crítica o valor limite que separa o comportamento das estacas em rasas ou profundas, ou seja, $H_1/D_1 = (H_1/D_1)_{cr}$. De acordo com Das (1990), para solos arenosos a relação $(H_1/D_1)_{cr}$ é dada em função do ângulo de atrito interno do solo. Por outro lado, para solos argilosos esta variação é dada em função da coesão.

Dependendo do ângulo de atrito interno do solo e da relação H_1/D_1 a superfície de ruptura pode não atingir a superfície do terreno. Caso isso ocorra, considera-se que a ancoragem é profunda (Das, 1990). Segundo Stephenson (2003), uma razão de H_1/D_1 igual a 3 é suficiente para configurar a condição de ancoragem profunda, independentemente do tipo de solo.

A Tabela 2.1 apresentada por Das (1990), mostra a variação da razão crítica em função do ângulo de atrito interno do solo para solos arenosos.

Tabela 2.1 – Valores de $(H_1/D_1)_{cr}$ em função do ângulo de atrito (Das, 1990).

Ângulo de atrito do solo, ϕ (graus)	$(H_1/D_1)_{cr}$
25	3
30	4
35	5
40	7
45	9
48	11

2.6.2 Influência do espaçamento relativo entre hélices

Para estacas helicoidais de múltiplas hélices, considera-se a influência de uma superfície de ruptura, que pode ocorrer de forma separada ou em conjunto, a partir da contribuição de cada hélice da ancoragem. Além das condições geotécnicas do solo, o comportamento da superfície de ruptura também depende das condições geométricas do espaçamento relativo entre as hélices.

De acordo com o manual técnico A. B. Chance Co. (2014), quando o espaçamento relativo entre as hélices (s/D_{med}) for menor do que três, as hélices estarão próximas o suficiente para que uma hélice exerça influência umas sobre as outras, favorecendo o surgimento de uma superfície de ruptura geral aproximadamente tronco-cônica, o que corresponde a ruptura do método do cilindro de cisalhamento. Nesta expressão, s corresponde ao espaçamento entre as hélices da estaca e D_{med} corresponde ao diâmetro médio das hélices da estaca.

Caso o espaçamento relativo entre hélices seja superior a três, as hélices não exercerão influência umas sobre as outras, o que proporcionará ao sistema de fundação um mecanismo de ruptura individual em cada hélice (A. B. Chance, 2014). Lutenneger (2011) afirma que a transição entre os mecanismos de ruptura ocorre quando o espaçamento relativo é igual a 3, para areias, e 2,5 para argilas.

Perko e Rupiper (2000) sugerem que quando possível, a capacidade de carga seja determinada tanto pelo método do cilindro de cisalhamento quanto pelo método das capacidades individuais, considerando a confiabilidade dos parâmetros fornecidos. Eles sugerem também que a capacidade seja verificada *in situ* através das

relações com o torque de instalação, que segundo Hoyt e Clemence (1989) é um método de avaliação bastante confiável.

2.7 Métodos de previsão de capacidade de carga

Os três principais métodos de previsão de capacidade de carga em estacas helicoidais submetidas à tração são: método do cilindro de cisalhamento, método das capacidades de carga individuais e o método através da medição do torque *in situ* (Perko, 2009).

2.7.1 Método do cilindro de cisalhamento

Segundo o manual A. B. Chance. Co. (2014), para que haja a condição de ruptura pelo método do cilindro de cisalhamento o espaçamento entre hélices deve ser igual ou inferior a três vezes o diâmetro médio das hélices. Este tipo de ruptura pode ocorrer tanto na condição de ancoragem rasa, quanto na condição de ancoragem profunda.

A Figura 2.6 mostra um diagrama teórico de como ocorre a ruptura pelo método do cisalhamento cilíndrico ao longo das hélices situadas abaixo da hélice de topo. A ruptura é tratada como um único tronco de cone. Esse comportamento se dá devido à influência que uma hélice exerce sobre a outra, justificado pelo curto espaçamento entre elas.

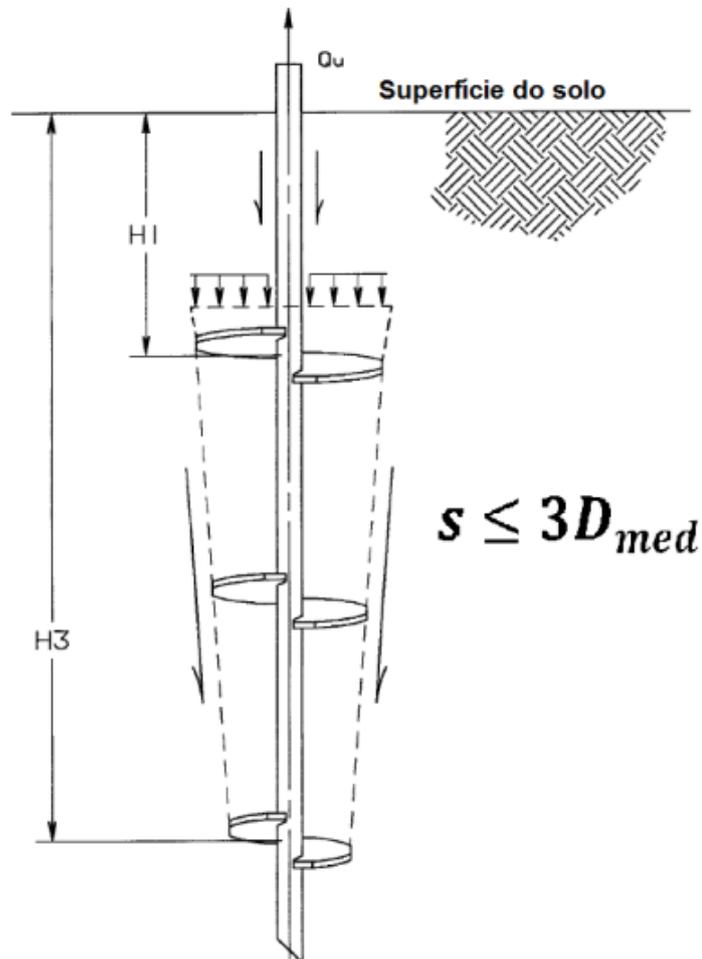


Figura 2.6 – Ruptura pelo método do cisalhamento cilíndrico (Hoyt e Clemence, 1989).

2.7.2 Condição de ancoragem rasa

Segundo o manual técnico da A. B. Chance Co. (2014), para que haja uma superfície de ruptura na condição rasa em solos arenosos, o embutimento da hélice de topo não deve ser superior a cinco ($H_1 \leq 5$). A Figura 2.7 mostra uma estaca helicoidal com quatro hélices embutida em um solo arenoso, submetida a um carregamento vertical de tração, com a indicação da superfície de ruptura que se estende até a superfície do solo, formando um tronco de cone com um ângulo aproximadamente igual à metade do ângulo de atrito do solo (Das, 1990).

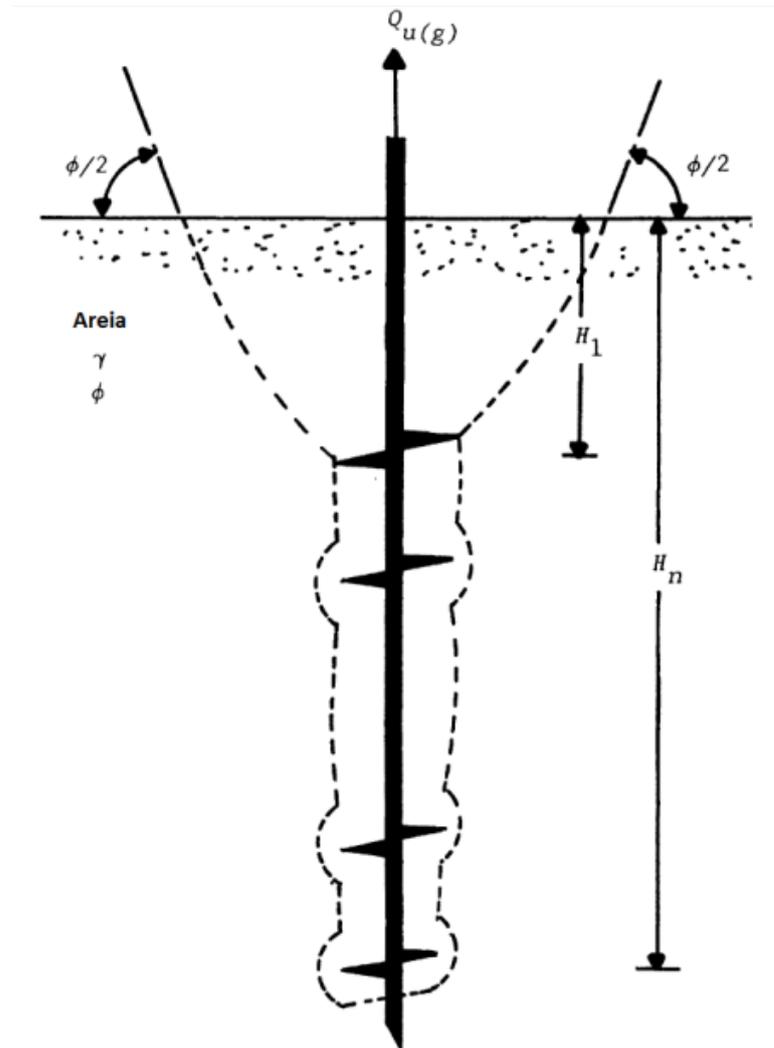


Figura 2.7 – Superfície de ruptura pelo método do cisalhamento cilíndrico na condição de ancoragem rasa para um solo arenoso (Das, 1990).

Devido à complexidade geométrica da superfície de ruptura, Mitsch e Clemence (1985) sugerem uma simplificação da superfície de ruptura para ancoragens helicoidais, como mostrado na Figura 2.8. Esta simplificação geométrica objetiva facilitar o desenvolvimento do equacionamento matemático de capacidade de carga que seja mais próximo do comportamento real de resistência da ancoragem proposta na Figura 2.7.

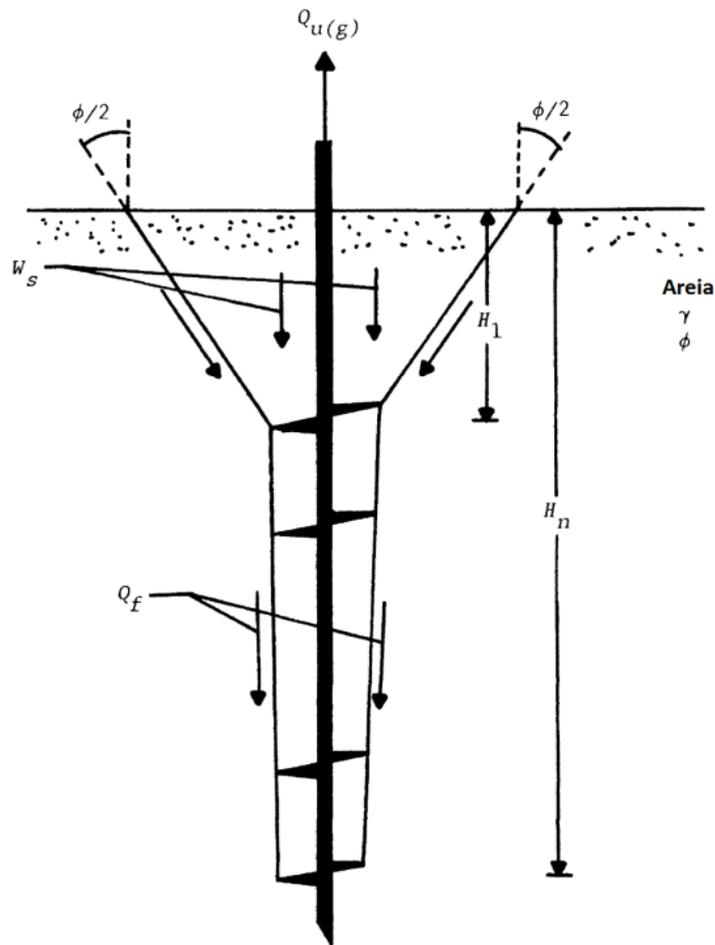


Figura 2.8 – Superfície de ruptura idealizada do método do cisalhamento cilíndrico na condição de ancoragem rasa para um solo arenoso (Das, 1990).

De acordo com Mitsch e Clemence (1985), a capacidade de carga à tração (Q_u) é estimada através da expressão (2.1), que considera a sobreposição das contribuições das resistências da superfície de ruptura do tronco de cone formado acima da hélice de topo (Q_p) e do atrito de interface da superfície de ruptura tronco-cônica formado entre as hélices de ponta e de topo (Q_f).

$$Q_u = Q_p + Q_f \quad (2.1)$$

A resistência acima da hélice de topo é dada pela expressão (2.2):

$$Q_p = \pi \gamma' K_u \left\{ \tan \phi [(\cos(\phi/2))^2] \left[\frac{D_1 H_1^2}{2} + \frac{H_1^3 \tan(\phi/2)}{3} \right] \right\} + W_s \quad (2.2)$$

Sendo γ' o peso específico efetivo do solo, K_u o coeficiente de empuxo e ϕ o ângulo de atrito interno do solo. A parcela do peso do tronco de cone do solo, acima da hélice de topo é dada expressão pela equação (2.3):

$$W_s = \gamma' \left\{ \frac{\pi}{3} H_1 \left[(D_1)^2 + \left(D_1 + 2H_1 \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) \right)^2 + (D_1) \left(D_1 + 2H_1 \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) \right) \right] \right\} \quad (2.3)$$

A resistência por atrito ao longo da superfície cilíndrica formada pelas hélices é expressa pela equação (2.4):

$$Q_f = \frac{\pi}{2} D_{med} \gamma' (H_n^2 - H_1^2) K_u \tan \phi \quad (2.4)$$

Onde H_n é a altura da profundidade da hélice de ponta da estaca e D_{med} é o diâmetro médio das hélices. De acordo com Mitsch e Clemence (1985), os valores do coeficiente de empuxo são dados em função do ângulo de atrito interno do solo, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de K_u para alguns ângulos de atrito do solo (Mitsch e Clemence, 1985).

Ângulo de atrito interno do solo (°)	Coeficiente de empuxo (K_u) para ancoragens helicoidais
25	0,70
30	0,90
35	1,50
40	2,35
45	3,20

Observa-se que o coeficiente de empuxo à tração do solo (K_u) aumenta com a relação H_1/D_1 , até o um valor crítico $H_1/D_1 = (H_1/D_1)_{cr}$. A Figura 2.9 mostra a variação do empuxo à tração em função do embutimento relativo e do ângulo de atrito do solo (ϕ). Nota-se que a partir de um determinado valor de embutimento, o coeficiente de empuxo à tração do solo (K_u) torna-se constante.

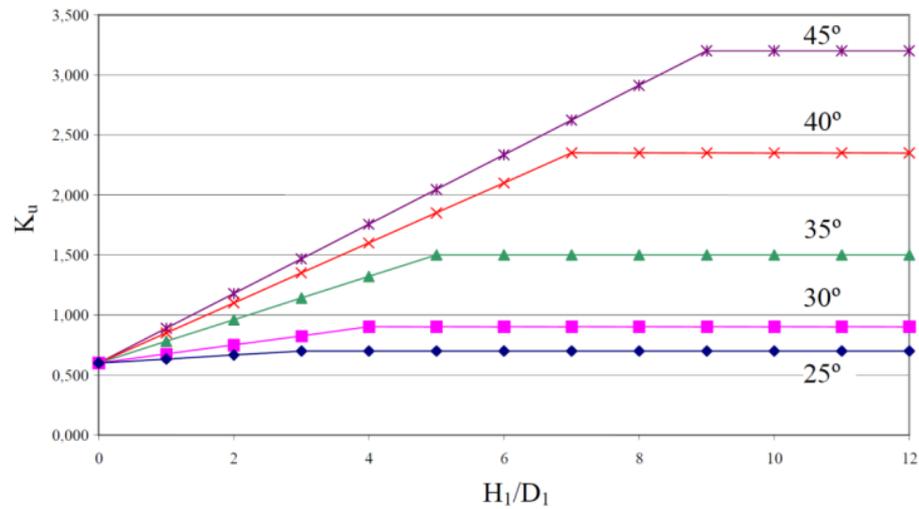


Figura 2.9 – Variação de K_u em relação a H_1/D_1 e ϕ (Das, 1990).

2.7.3 Métodos das capacidades de carga individuais

De acordo com Hoyt e Clemence (1989), se o espaçamento relativo entre as hélices de uma estaca helicoidal for superior a três, em um solo arenoso, as hélices não exercerão influência umas sobre as outras, ocasionando rupturas localizadas em cada hélice da estaca. A Figura 2.10 mostra o esquema de ruptura localizada.

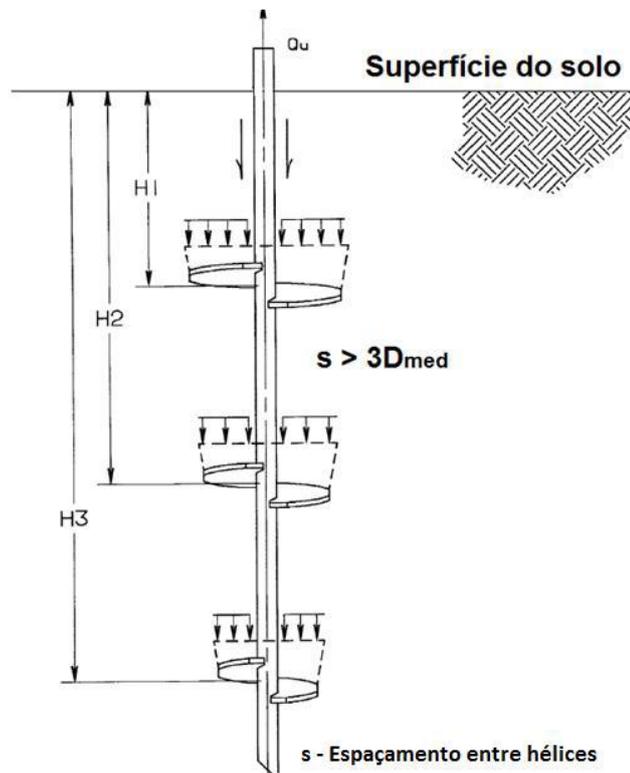


Figura 2.10 – Esquema de ruptura localizada (adaptado de Hoyt e Clemence, 1989).

Segundo Das (1990), a ruptura localizada individual em cada hélice ocorrerá quando o espaçamento entre hélices for maior ou igual a uma vez e meia o diâmetro médio das suas hélices ($s \geq 1,5D_{med}$). Adotando-se a teoria geral de Terzaghi para o cálculo da capacidade de carga individual em cada hélice, resulta na sobreposição das capacidades de carga individual de cada hélice, dado pela equação (2.5).

$$Q_u = A_h \sum_{n=1}^n (cN_c + q'N_q + 0,5\gamma'BN_\gamma) \quad (2.5)$$

Sendo A_h a área da hélice projetada e q' a pressão de sobrecarga efetiva do solo sobre a hélice. Para o caso de estacas em areia ($c = 0$) o termo “ $0,5\gamma'BN_\gamma$ ” é geralmente ignorado para estacas helicoidais, devido à pequena dimensão relativa do diâmetro das hélices em comparação as dimensões das fundações. Reorganizando a expressão (2.5), resulta na equação (2.6):

$$Q_u = A_h \sum_{n=1}^n (q'N_q) \quad (2.6)$$

O fator de capacidade de carga (N_q) pode ser obtido pela Figura 2.11.

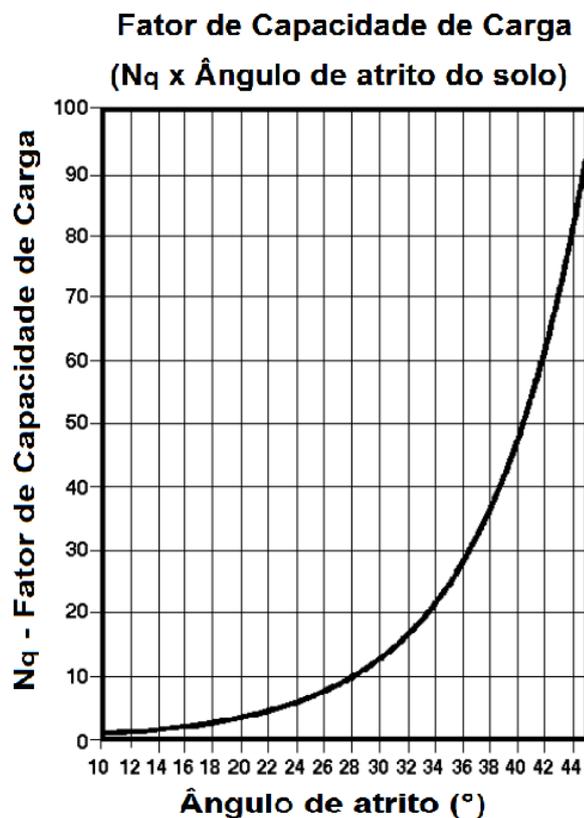


Figura 2.11 – Gráfico que relaciona o fator de capacidade de carga com o ângulo de atrito interno para solos arenosos (adaptado de A. B. Chance Co., 2014).

2.8 Interpretação da curva de prova de carga à tração pelo Método de Davisson (1972)

De acordo com Perko (2009), o método de Davison (1972) é um dos métodos de interpretação mais recomendados entre os executores de estacas e ancoragens helicoidais nos Estados Unidos. O método de Davison (1972) consiste em traçar uma linha com inclinação igual à deformação elástica da estaca em 10% do seu diâmetro médio. A Figura 2.12 mostra o segmento linear proposto no método de Davison (1972), interceptando a curva de carregamento versus deslocamento de um ensaio de prova de carga à tração de uma estaca helicoidal. A Capacidade de carga é definida como a carga correspondente ao ponto em que o segmento proposto pelo método de Davisson intercepta a curva carga versus deslocamento. Na Figura 2.12, a expressão $\frac{PL}{AE}$ representa a deformação elástica da estaca.

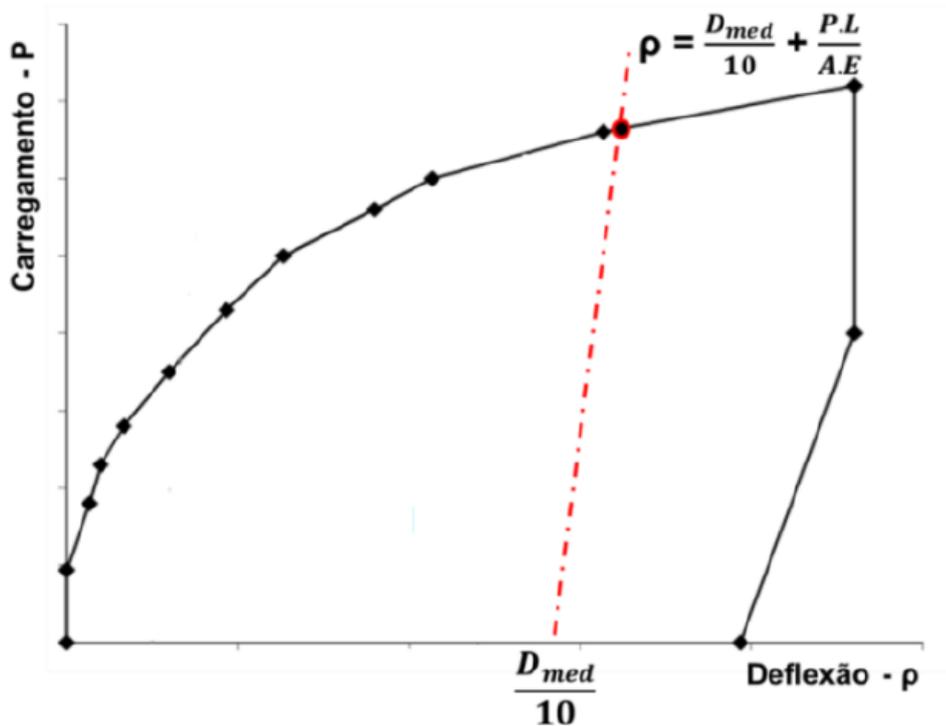


Figura 2.12 – Representação do Método de Davisson (1972) para determinação da carga última na curva de uma prova de carga (adaptado de Perko, 2009).

CAPÍTULO 3

Materiais e métodos

3.1 Local de realização dos ensaios

Os ensaios desta pesquisa foram realizados em um campo experimental (coordenadas UTM 255829.00 m E e 93544649.48 m S) localizado no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal/RN. O terreno utilizado encontra-se ao lado do prédio do Instituto do Cérebro. A Figura 3.1 apresenta a localização do campo experimental, bem como a posição da sondagem mais próxima e também as posições das quatro instalações da estaca helicoidal dentro do campo experimental. A Figura 3.2 mostra uma vista geral do terreno do campo experimental.

3.2 Características geológicas do local

Segundo Gusmão Filho (1982), a cidade de Natal, bem como a maioria das cidades nordestinas têm como solos predominantes, em sua superfície, as areias, geralmente finas e fofas, frequentemente siltosas.

De acordo com Jesus (2002), O Campus Central da UFRN, assim como toda a cidade de Natal, é formado essencialmente por materiais de origem sedimentar. São encontrados sedimentos do período terciário e quaternário. Os sedimentos terciários são conhecidos como Formação Barreiras, compreendendo os sedimentos cenozoicos que afloram ao longo do litoral oriental brasileiro.

A Figura 3.3 apresenta a geologia da região litorânea do Estado, podendo-se observar a Formação Barreiras, predominante na região, e também a preponderância da areia de duna como solo superficial (sedimentos quaternários).

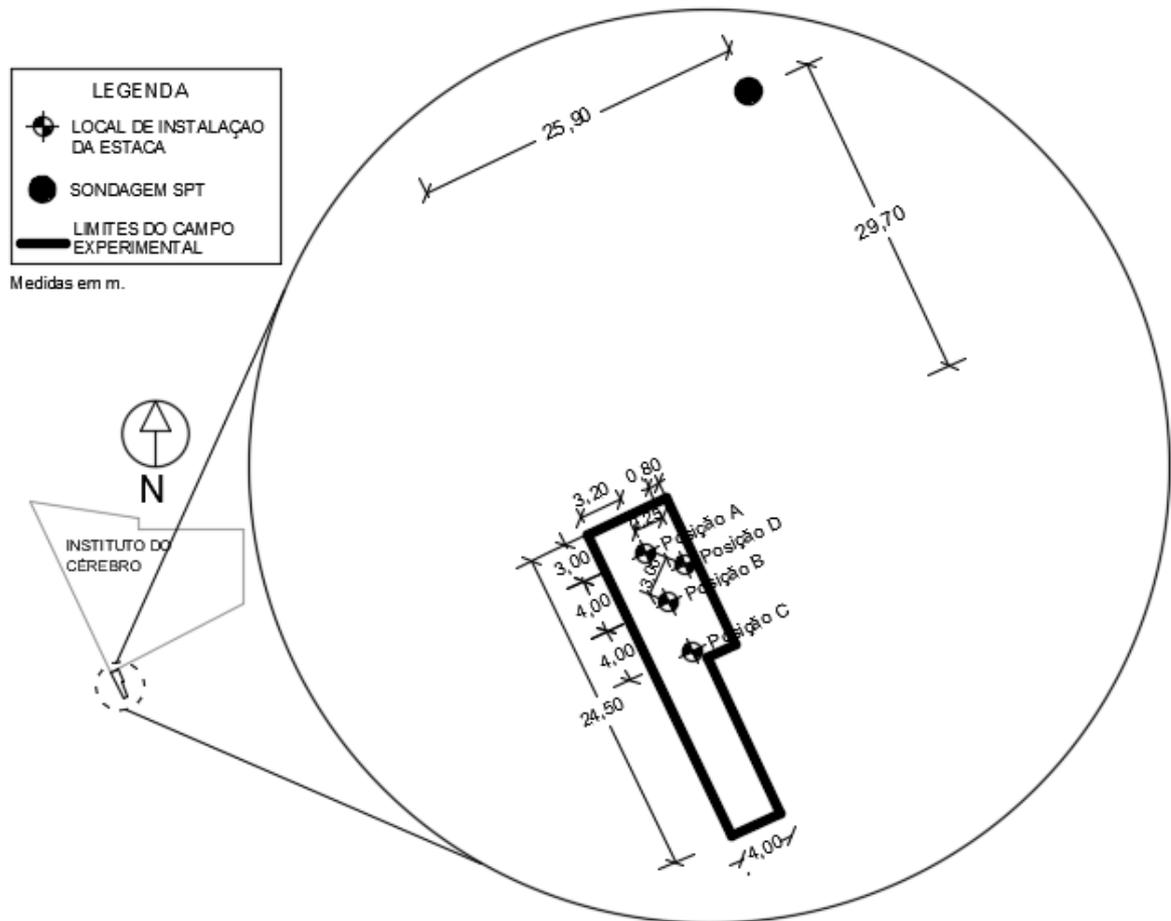


Figura 3.1 – Representação do campo experimental (adaptado de Costa, 2017a).



Figura 3.2 – Vista geral do terreno do campo experimental.

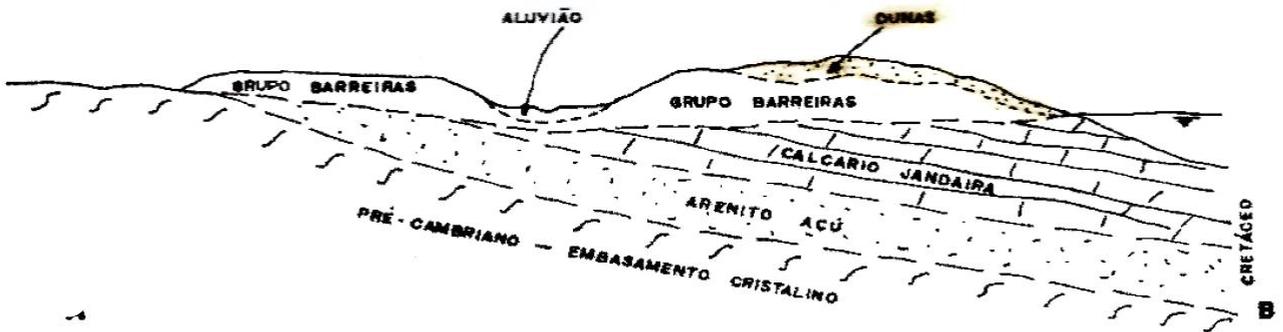


Figura 3.3 – Seção típica da geologia da cidade de Natal (Gusmão Filho, 1982).

3.3 Características geotécnicas do local da pesquisa

O programa de investigação da obra ao lado do campo experimental foi composto de treze sondagens de simples reconhecimento com SPT, realizadas de acordo com a ABNT NBR 6484/2001. Devido à proximidade dos ensaios das estacas, apenas o resultado da sondagem SP02, mostrada na Figura 3.4, foi representado. A Figura 3.4 mostra o perfil do solo obtido do furo SP02 que se assemelha aos outros perfis do programa de investigação. As sondagens não identificaram o nível do lençol freático.

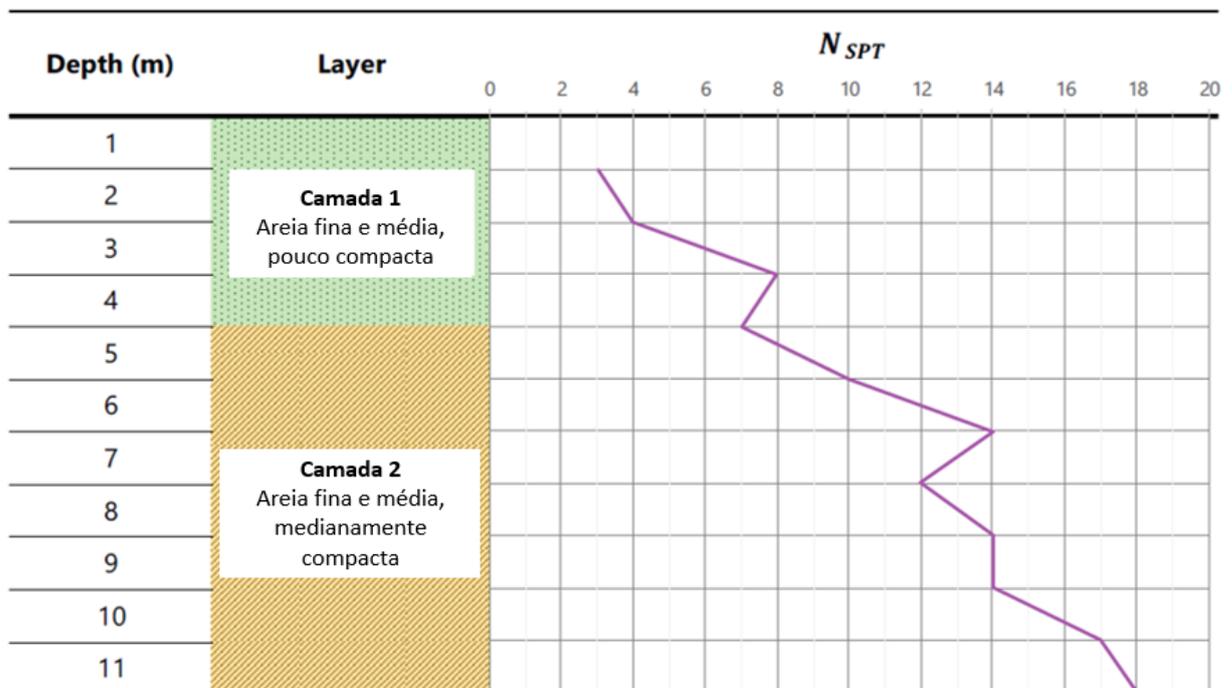


Figura 3.4 – Perfil do solo obtido do furo SP02 (Costa, 2017b).

Após a realização das provas de carga em campo, foi feita a desmontagem do sistema de reação e em seguida executada uma escavação com o uso de uma enchedeira. Desta forma, foi possível confirmar o perfil de sondagem obtido no furo de sondagem SP02 como representativo do subsolo da área do campo experimental (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Vista lateral de um corte após conclusão da última prova de carga.

Costa (2017b), realizou uma caracterização geotécnica no terreno ao lado do campo experimental desta pesquisa, e constatou o seguinte, a aproximadamente 1 m de profundidade: areia de classificação SP de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (contendo 27% de areia fina, 72% de areia média, 1% de areia grossa), com coeficiente de uniformidade de 1,96; coeficiente de curvatura de 0,99. A massa específica dos sólidos encontrada foi de 2,63 g/cm³. Ensaios de cisalhamento direto feitos em duas amostras forneceram ângulo de atrito interno efetivo de 32° e 36° para densidades relativas de 34% e 71%, respectivamente.

3.4 Instrumentação da estaca

A estaca helicoidal utilizada na pesquisa é a mesma utilizada por Costa (2017b) em seu trabalho, sendo feitas apenas as modificações necessárias para a instrumentação, que foram a soldagem de anéis metálicos de proteção e a abertura de furos para passagem dos cabos, mostradas na Figura 3.6. Foram instrumentadas cinco seções ao longo da estaca, adotando-se a nomenclatura de Seção 1 (S1) a Seção 5 (S5).

A Figura 3.6 também mostra a posição e a nomenclatura adotada de cada seção instrumentada. Das cinco seções instrumentadas, duas seções foram para medição de torque (S1 e S4) e três para medição de esforço normal (S2, S3 e S5).

Foram utilizados extensômetros elétricos (*strain gages*) do tipo roseta dupla a 90°, de fabricação da Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda, cuja referência é PA-06-125TG-120LEN, com fator de sensibilidade (k) igual a 2,04. Esse modelo possui duas grades de elemento resistivo, constituídas por filmes metálicos de constantan, apoiadas em uma única base de poliamida. Cada grade de medição possui uma resistência de 120 ohms. As dimensões desses extensômetros são: a = 3,18 mm, b = 3,18 mm, c = 5,72 mm e d = 8,71 mm (Figura 3.7).

Os *strain gages* foram montados em circuito de ponte de Wheatstone completa. Este sistema permite eliminar os efeitos das deformações oriundas da flexão e efeitos térmicos.

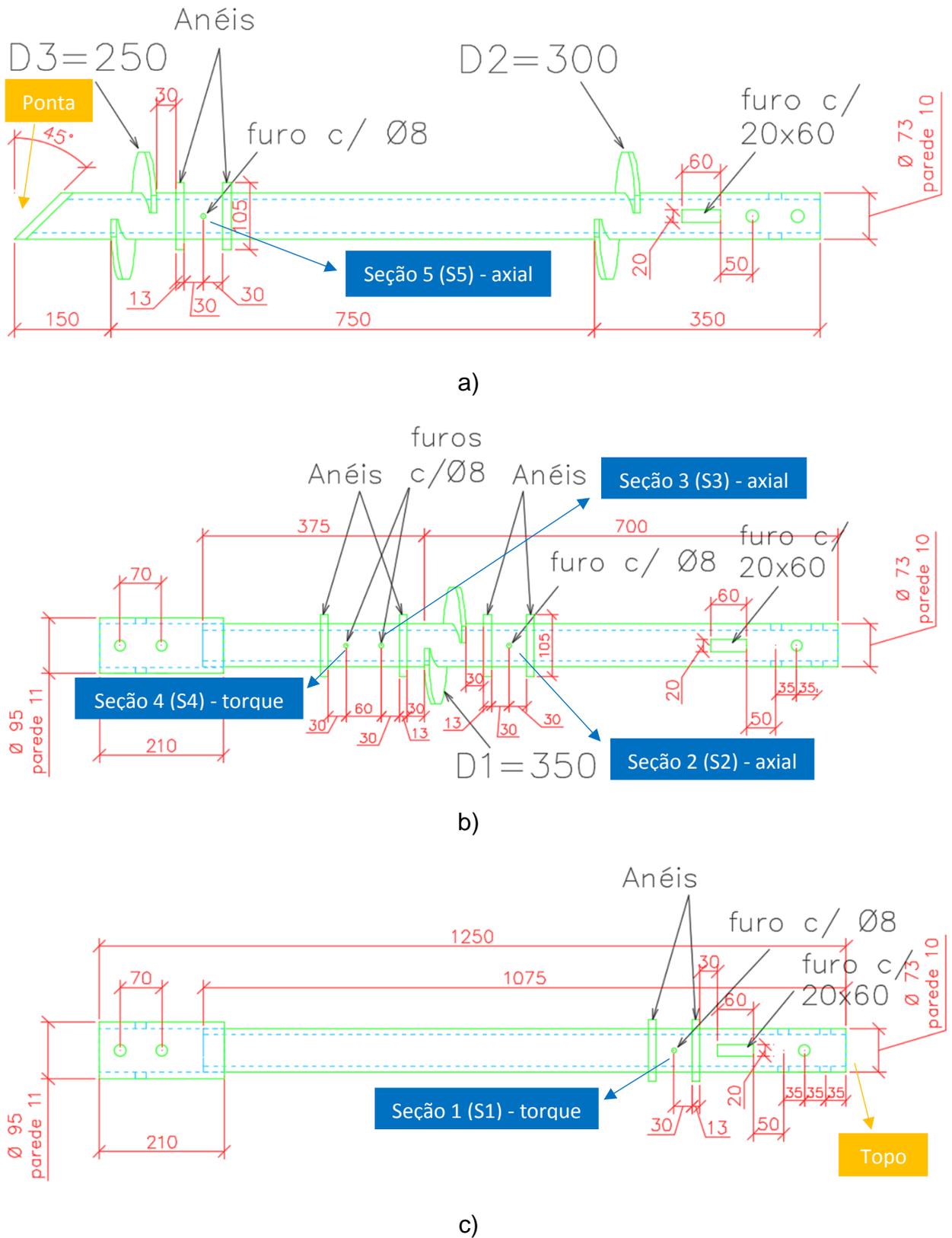


Figura 3.6 – Segmentos da estaca e localização das seções instrumentadas: (a) seção guia; (b) seção de extensão com hélice; (c) seção de extensão simples; dimensões em milímetro; sem escala.

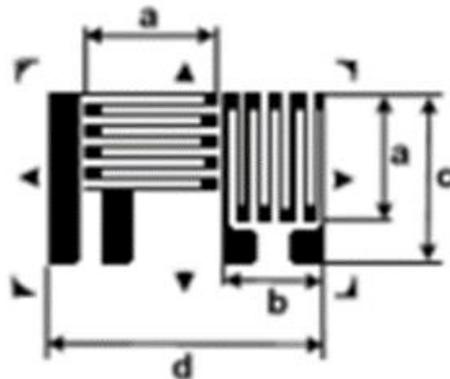


Figura 3.7 – Detalhe do extensômetro utilizado (Excel Sensores, 2016).

3.4.1 Preparação da estaca

Como as deformações dos extensômetros deveriam ser, o tanto quanto possíveis, as mesmas da seção da estaca, realizou-se uma preparação extremamente criteriosa para garantir o seu perfeito funcionamento. A preparação é descrita sumariamente a seguir.

3.4.1.1 Preparação da superfície

- a) Inicialmente, foi executada a soldagem dos anéis metálicos (Figura 3.8.a).
- b) Em seguida, foram feitos os furos nas seções de instrumentação.
- c) Usou-se uma furadeira fresadora para executar o rasgo na parte superior dos segmentos da estaca helicoidal (Figura 3.8.b).
- d) Posicionaram-se os segmentos da estaca em um torno e utilizou-se uma esmerilhadeira para executar o lixamento grosso (Figura 3.8.c).
- e) Com lixas N° 60 promoveu-se a regularização preliminar da superfície, eliminando grandes saliências e eventuais óxidos ainda presentes (Figura 3.8.d).
- f) Com lixas N°80, 100, 120 e 150 realizou-se um lixamento fino, reduzindo as imperfeições ou irregularidades da superfície que pudessem prejudicar o contato entre os extensômetros e a estaca (Figura 3.8.e).
- g) Em seguida, fizeram-se linhas de orientação marcando a localização que deveriam estar os extensômetros nas seções instrumentadas.

- h) Com gaze embebida em álcool procedeu-se à limpeza da superfície até obter-se gaze limpa com o decorrer do tempo, realizando sempre a limpeza do centro para as bordas no intuito de evitar contaminação da área central por eventuais impurezas presentes nas bordas.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 3.8 – Preparação da superfície: (a) soldagem dos anéis; (b) rasgo na parte superior do segmento; (c) lixamento grosso; (d) utilização da lixa N^o 60; (e) lixamento fino.

3.4.1.2 Colagem dos extensômetros e passagem dos cabos

- a) Dispôs-se os extensômetros sobre uma placa de vidro limpa, sendo, nesta etapa, os extensômetros manuseados com pinça metálica.
- b) Com uma fita adesiva disposta sobre o extensômetro, retirou-se o mesmo da placa de vidro, colocando-o sobre a seção instrumentada (atentando-se para as marcações feitas em etapa anterior).
- c) Após verificada a posição do extensômetro, levantou-se a fita com o extensômetro e colocou-se adesivo (cianoacrilato) na superfície da estaca, sendo logo após recolocada a fita na posição original. Pressionou-se cuidadosamente a fita para eliminar eventuais bolhas de ar que pudesse ficar presentes entre as superfícies. Os extensômetros utilizados para medição de torque foram colados a 45° em relação ao eixo longitudinal da estaca, e os extensômetros para medição de esforço normal foram colados na mesma direção do eixo longitudinal (Figura 3.9.a).
- d) Com o auxílio de um arame, procedeu-se à passagem dos cabos por dentro da estaca até que o mesmo saísse pelo rasgo feito na parte superior de cada segmento da estaca, deixando-se uma parte do cabo na seção que seria instrumentada para montagem do circuito (Figura 3.9.b).
- e) Dispôs-se uma fita isolante entre a superfície e os pontos de ligação dos extensômetros com o cabo de aquisição de dados, com vistas a exaurir a possibilidade de curto-circuito entre estes (Figura 3.9.c).
- f) Por fim verificou-se através de ohmímetro se a resistência aferida era a fornecida pelo fabricante e, se ao pressionar a superfície do extensômetro protegida com a fita, haveria alguma variação da medida, o que poderia indicar defeito na colagem ou no extensômetro, sendo necessário removê-lo.



a)



b)



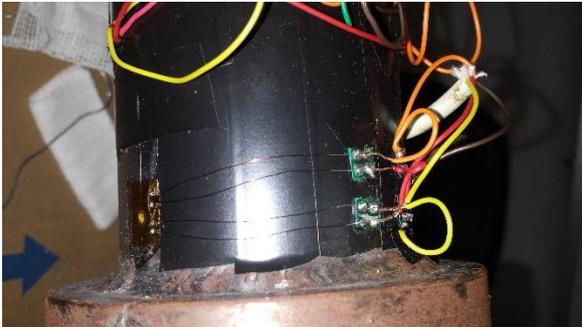
c)

Figura 3.9 – Colagem dos extensômetros e passagem dos cabos: (a) colagem dos extensômetros; (b) passagem dos cabos; (c) colocação da fita isolante.

3.4.1.3 Ligação dos fios

- a) Utilizou-se cabo manga de 5 vias, mas apenas 4 destas foram efetivamente utilizadas. O cabo dispunha de malha de proteção.
- b) A ligação entre os fios do extensômetro e as vias do cabo de aquisição de dados foi feita com solda, aplicada nos terminais de ligação que foram colados.
- c) Tomou-se o cuidado para que os fios não ficassem tensionados, evitando-se, desta forma, o rompimento por qualquer esforço mecânico que pudesse ocorrer. O detalhe das ligações é apresentado na Figura 3.10.a e na Figura 3.10.b, atentando-se para as cores e posição dos fios utilizados.

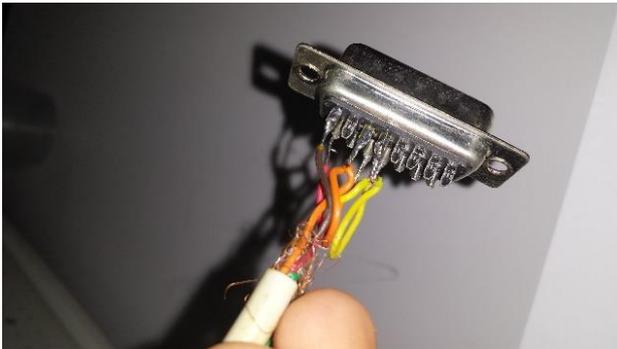
- d) Foi utilizada porta serial de 15 pinos para conexão da seção instrumentada com o aquisitor de dados HBM Spider 8. A Figura 3.10.c detalha as ligações realizadas na porta serial.



a)



b)



c)

Figura 3.10 – Montagem do circuito: (a) e (b) ligação dos fios aos terminais; (c) ligação na porta serial

3.4.1.4 Proteção

- a) Para proteção de todo o conjunto de ligações, aplicou-se resina de silicone RK, fornecida pela Excel Sensores, sobre toda a região do extensômetro e das ligações. Essa resina caracteriza-se por polimerizar-se em contato com o ar, conferindo grande resistência mecânica e impermeabilidade. Utilizou-se de abraçadeiras para garantir uma certa quantidade de cabo dentro da seção instrumentada (Figura 3.11.a).
- b) Aplicou-se fita isolante autofusão para reforçar a proteção mecânica e elétrica (Figura 3.11.b).

- c) Por fim, recobriu-se todo o conjunto com uma luva metálica, preenchendo-se os espaços vazios com resina epóxi, finalizando a proteção da instrumentação. As seções de medição de torque foram utilizadas luva metálica por fora dos anéis e as de esforço normal por dentro dos anéis (Figura 3.11.c).



a)



b)



c)

Figura 3.11 – Proteção: (a) resina de silicone RK e abraçadeiras; (b) fita isolante autofusão; (c) luva metálica e resina epóxi.

3.4.2 Calibração das seções instrumentadas para esforço axial

As seções instrumentadas para medição de esforço normal foram calibradas e testadas em laboratório por meio de ensaio de tração com a finalidade de verificar se a instrumentação estava funcionando adequadamente e também determinar o módulo de elasticidade da estaca. A Figura 3.12 mostra uma vista superior do esquema da montagem da calibração e a Figura 3.13 mostra o ensaio de calibração em execução.

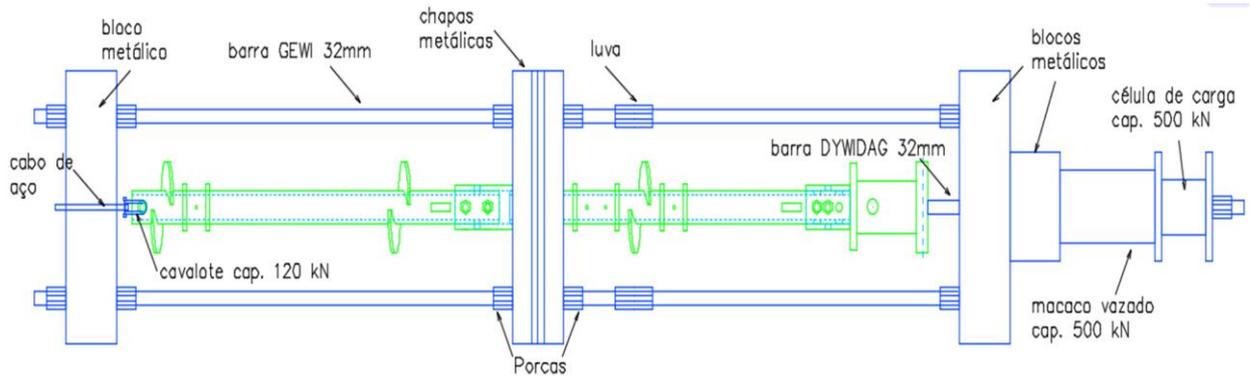


Figura 3.12 – Vista superior do esquema da montagem para calibração da instrumentação.



Figura 3.13 – Ensaio de calibração em execução.

Durante a calibração foi aplicada a carga inicial de 10 kN, e em seguida aplicaram-se incrementos de 10 kN até a carga máxima de 100 kN. Logo após foi feito o descarregamento em decrementos de 10kN até o descarregamento total. Sempre que um valor de carga era aplicado, media-se o valor de deformação específica sofrida pelas seções instrumentadas S2, S3 e S5.

O sistema usado na aquisição dos dados foi o *Spider 8* da HBM, um sistema eletrônico capaz de medir sinais elétricos e convertê-los para variáveis como deformação, resistência, força, pressão, aceleração, temperatura e deslocamento linear. O software utilizado por este sistema é o *Catman*, que possibilita a leitura e

tratamento de sinais de sensores como acelerômetros, células de carga, extensômetros e LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*). Os dados adquiridos são visualizados e analisados em tempo real, e também são estabelecidas as configurações dos projetos ou ensaios.

3.5 Instalação da estaca

A estaca foi instalada verticalmente no solo usando-se uma perfuratriz hidráulica (modelo MC150 fabricada pela *CZM Foundation Equipment*) como mostra a Figura 3.14. O motor hidráulico possui um torque nominal máximo de 9,3 kN.m (CZM Foundation Equipment, 2012).



Figura 3.14 – Instalação da estaca.

Uma vez que um dispositivo de medição de torque independente não estava disponível, as estacas foram instaladas no solo até atingir o torque máximo fornecido pela perfuratriz hidráulica, sendo feitas as leituras de torque a partir das deformações das seções instrumentadas S1 e S4 durante a instalação.

Foram feitas quatro instalações nas Posições A, B, C e D, mostradas na Figura 3.1. A distância entre as instalações foi sempre superior a cinco vezes o diâmetro da maior hélice, para evitar interferência de uma instalação em outra (Livneh e El Naggar 2008). As profundidades das instalações foram 2,77 m para as Posições A e D, 2,57 m para a Posição B e 2,30 m para a Posição C.

Durante a instalação de cada segmento da estaca, os cabos da instrumentação eram conduzidos pelo interior da estaca e saíam pelo rasgo feito na parte superior de cada segmento. Após instalado o primeiro segmento da estaca (seção guia), os cabos eram passados por dentro do segundo segmento da estaca (seção de extensão com hélice) e saíam pelo rasgo na parte superior deste segmento. Por fim, era feito esse mesmo procedimento para se instalar o terceiro e último segmento da estaca (seção de extensão simples). Todas as quatro instalações desta pesquisa seguiram essa ordem de instalação dos três segmentos da estaca.

3.6 Montagem da prova de carga

O sistema de reação das provas de carga usou duas vigas de aço com 3,0 m de comprimento apoiadas no solo, e duas vigas de aço com 6,0 m de comprimento apoiadas nas vigas de 3,0 m. Um macaco hidráulico vazado com capacidade de 500 kN, ligado a uma bomba hidráulica manual, foi utilizado para aplicar as cargas durante os ensaios. A carga aplicada na estaca foi medida usando-se uma célula de carga com capacidade de 500 kN instalada acima do macaco hidráulico. Tanto as leituras de carga aplicada quanto as deformações da instrumentação foram obtidas através do sistema de aquisição de dados previamente mencionado. Os deslocamentos verticais da estaca foram medidos através de quatro relógios comparadores, com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm. Os relógios foram montados no fuste da estaca e apoiados em vigas metálicas de referência de 3 m de comprimento. As Figuras 3.15.a-c mostram alguns detalhes da montagem típica das provas de cargas realizadas.



a)



b)



c)

Figura 3.15 – Montagem da prova de carga: (a) posicionamento das vigas de reação; (b) sistema de aquisição de dados; (c) relógios comparadores.

3.7 Execução das provas de carga

Foram realizados ensaios de tração com carregamento estático com mais de um ciclo de carga e descarga. As provas de carga foram baseadas na norma ASTM D3689-07 (ASTM, 2013). Na pesquisa, as duas provas de carga foram denominadas de Ensaios A e B.

3.7.1 Provas de carga à tração

Duas provas de carga estática foram realizadas dentro do campo experimental. Os procedimentos seguidos nestes ensaios foram baseados nos ensaios de carregamento rápido e cíclico descritos ASTM D3689-07 (ASTM, 2013). Antes de cada ensaio, foi aplicada uma pré-carga de 5 a 10% da carga de ruptura esperada.

O primeiro ensaio, denominado Ensaio A, realizado na Posição A da Figura 3.1, foi concluído após cinco ciclos de carga e descarga, com cargas máximas aplicadas de 12 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN e até a ruptura. As cargas foram aplicadas em incrementos de 4 kN e o descarregamento foi aplicado em decrementos iguais a 33% da carga máxima atingida no ciclo, sendo o último descarregamento feito após a ruptura em decrementos de 20%.

O segundo ensaio, denominado Ensaio B, realizado na Posição C da Figura 3.1, foi concluído após quatro ciclos de carga e descarga, com cargas máximas aplicadas de 20 kN, 40 kN, 60 kN, e até a ruptura. As cargas foram aplicadas em incrementos de 4 kN e o descarregamento foi aplicado em decrementos iguais a 25% da carga máxima atingida no ciclo, sendo o último descarregamento feito após a ruptura em decrementos de 20%.

3.7.2 Resumo dos ensaios

Um resumo da sequência e características das provas de carga executadas são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Sequência e características das provas de carga.

Ensaio	Número de ciclos	Posição	Profundidade da instalação (m)
A	5	A	2,77
B	4	C	2,30

3.8 Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)

Os ensaios penetrométricos foram executados de acordo com a norma ASTM D6951 / D6951M - 09 (ASTM, 2015). Foram realizados ensaios antes e após a instalação da estaca helicoidal, com a finalidade de se obterem evidências da perturbação do solo causada pelo procedimento de instalação da estaca helicoidal.

A coleta de dados com o DCP foi realizada nas Posições A, B e C de instalação da estaca, em sete pontos alinhados e distantes 100 mm entre si, conforme mostra a Figura 3.16. A coleta após a instalação da estaca foi realizada em um alinhamento inclinado 45° em relação à primeira linha de pontos, com a intenção de se evitar que a segunda coleta acontecesse sobre o solo já ensaiado anteriormente.

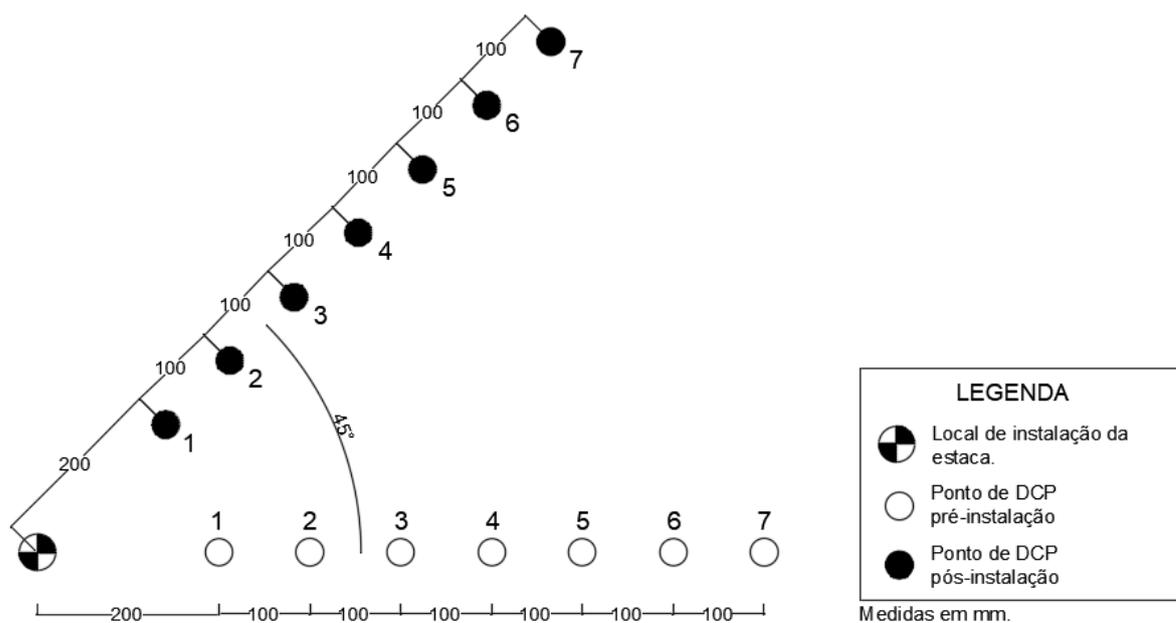


Figura 3.16 – Posição dos dados coletados com o DCP (Costa, 2017a).

O experimento se deu com o posicionamento do equipamento na posição vertical, de modo que não ocorresse inclinação do mesmo. O golpe inicial foi

considerado o golpe-zero, responsável pelo assentamento do equipamento no solo. Este golpe foi desconsiderado. Em seguida, seguiu-se com o ensaio, realizando-se leituras da penetração a cada golpe. Como o DCP utilizado possui capacidade máxima de penetração de 1 m, escolheu-se como critério de parada quando o ensaio atingiu a profundidade de 0,90 m. A Figura 3.17 mostra a execução do ensaio DCP.



Figura 3.17 – Execução do ensaio DCP.

3.9 Radar de Penetração do Solo (GPR)

A aquisição de sinais do GPR foi realizada com uma antena de frequência 900 MHz e ocorreu de acordo com os preceitos da norma ASTM D6432–11 (ASTM, 2011). O ensaio com o GPR foi feito no entorno da estaca instalada na Posição C. Ao todo, foram obtidos oito perfis paralelos, com comprimento total de 10 m e espaçamento de 100 mm entre si. A Figura 3.18 mostra o esquema da aquisição de dados com o GPR com os possíveis objetos que poderiam causar interferência no sinal. Tomou-se o cuidado para que a posição dos perfis do ensaio GPR não coincidisse com a posição

de realização do ensaio DCP, para não serem obtidas alterações no solo causadas pelo DCP.

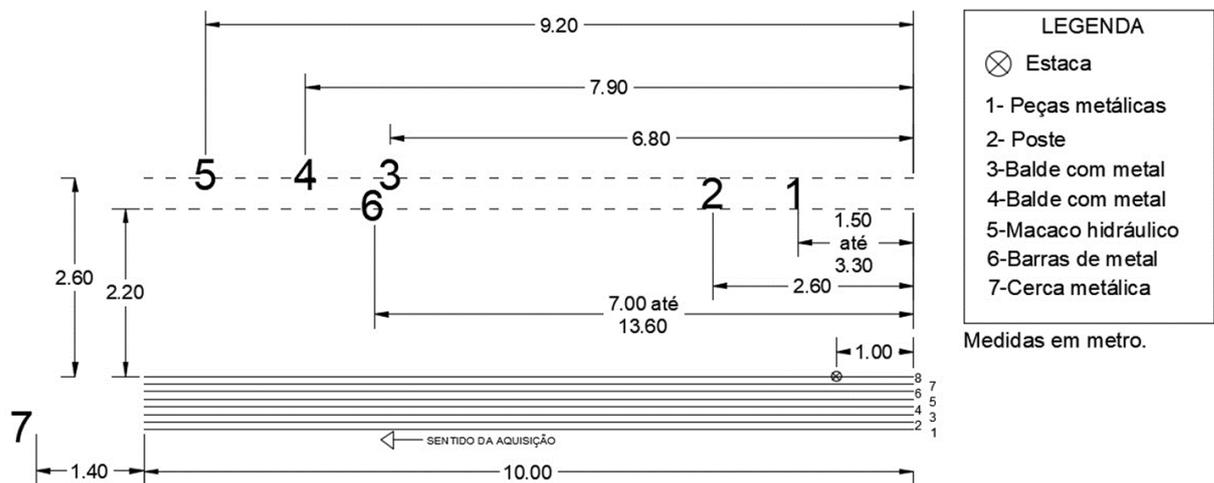


Figura 3.18 – Esquema da aquisição de dados com o GPR em torno da estaca na posição C.

Optou-se por fazer o levantamento iniciando-se 1 m do eixo da estaca na posição C seguindo até 9 m após a estaca, com intuito de visualizar as modificações causadas pela instalação da estaca em questão e obter as condições do subsolo em maior distância, fornecendo um panorama geral do subsolo.

Durante o processamento dos dados utilizou-se a informação da profundidade das hélices, a partir da porção da estaca que ficou na superfície, para estimar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no subsolo e determinar a constante dielétrica do meio investigado. As possíveis interferências existentes no entorno foram devidamente registradas para comparação com os resultados dos radargramas. A Figura 3.19 mostra a aquisição de dados realizada com o GPR.



Figura 3.19 – Aquisição de dados com o GPR.

3.10 Monitoramento da sucção matricial do solo

Foram instalados dois tensiômetros dentro da área do campo experimental da pesquisa com o intuito de monitorar a variação da sucção matricial do solo durante o período de execução dos ensaios de campo. Para isso, foi executado uma escavação de um metro de profundidade, e em seguida foram instalados os dois tensiômetros.

A Figura 3.20 mostra os tensiômetros instalados dentro da escavação. O início das leituras se deu no dia 19/09/2017 e o término no dia 16/11/2017, totalizando um período de 58 dias. Durante todo o período de monitoramento, os valores de sucção matricial do solo variaram de 5 a 8 kPa.

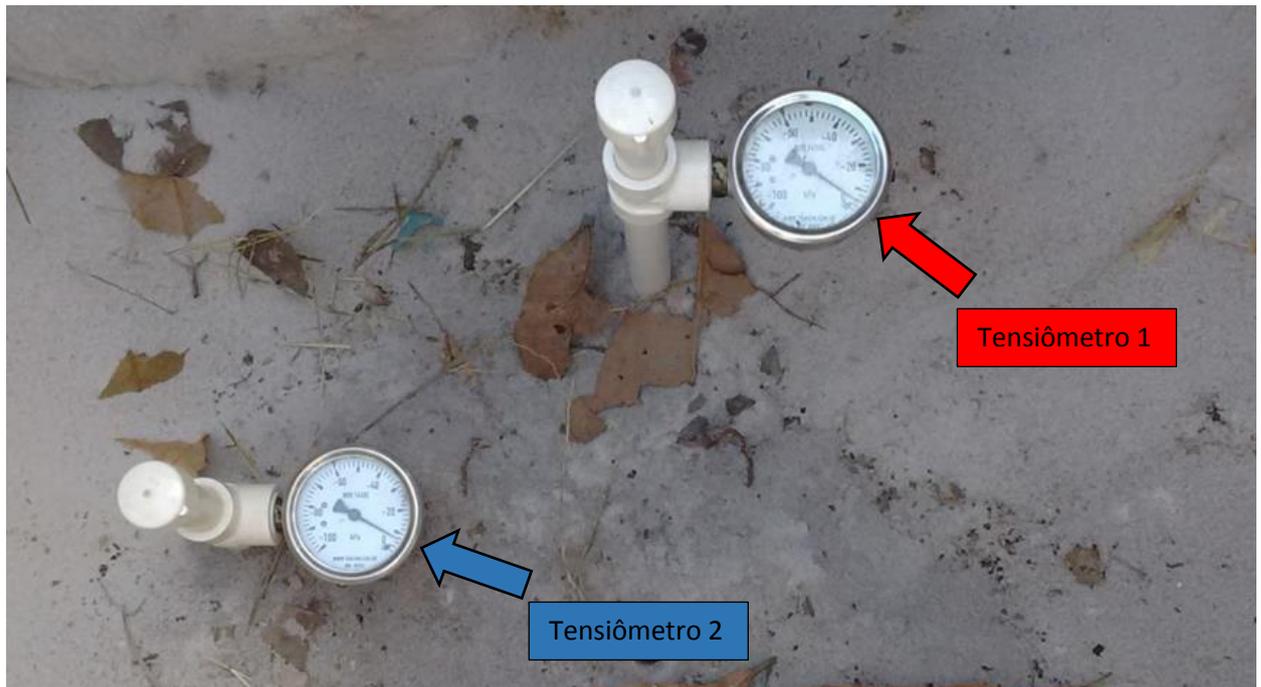


Figura 3.20 – Tensiômetros instalados no campo experimental.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta e discute os resultados da calibração das seções instrumentadas, os resultados do DCP, os resultados do GPR, os resultados das medições de torque durante a instalação da estaca, as provas de carga à tração, as previsões de capacidade de carga e as respostas das instrumentações durante as provas de carga.

4.1 Resultados da calibração das seções instrumentadas

Percebeu-se com a calibração que todas as seções instrumentadas apresentaram um comportamento linear da relação carga axial-deformação e, além disso, apresentaram muito pouca histerese. A Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 mostram, respectivamente, os gráficos da calibração das seções instrumentadas S2, S3 e S5.

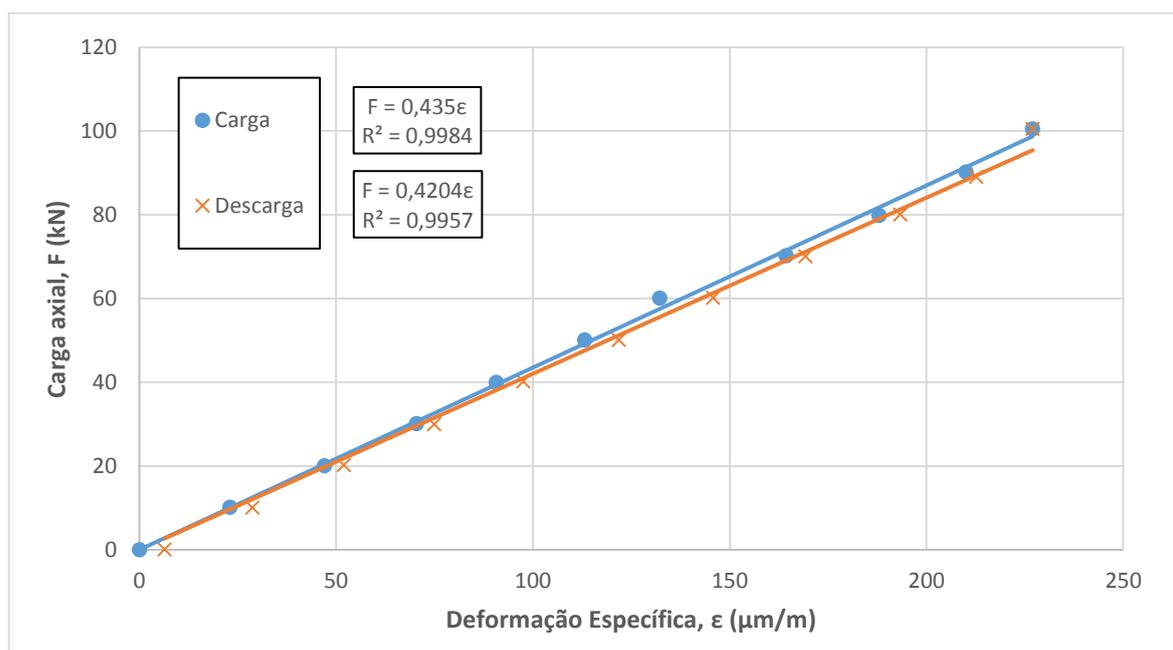


Figura 4.1 – Gráfico de calibração da S2.

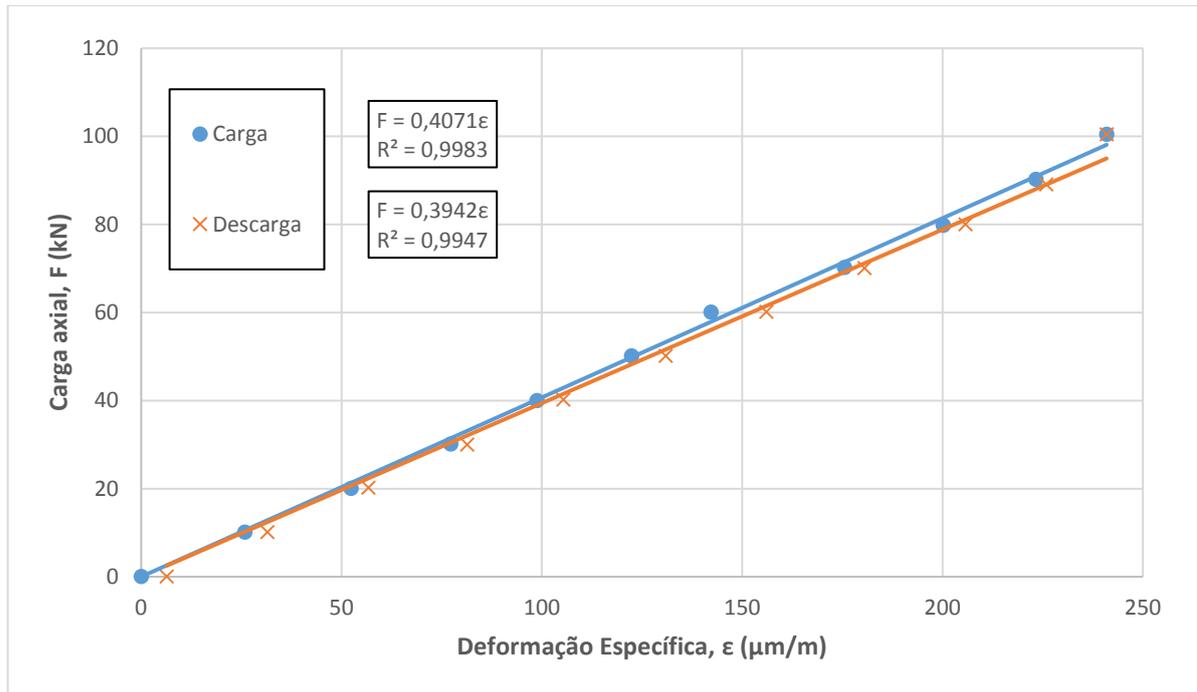


Figura 4.2 – Gráfico de calibração da S3.

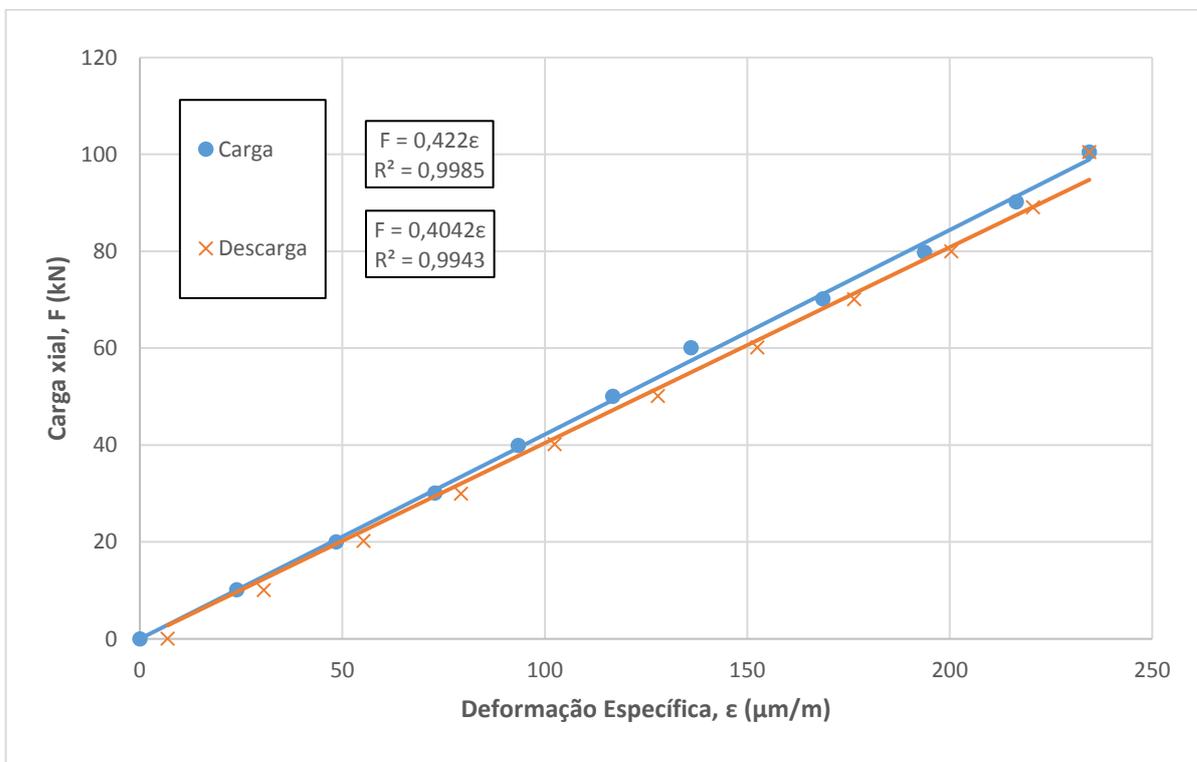


Figura 4.3 – Gráfico de calibração da S5.

4.2 Processo de instalação

Durante a instalação, a estaca foi inserida no solo até a recusa, com uma taxa de rotação aproximada de 40 rpm e uma taxa de penetração de 25 mm por rotação. Como o passo das hélices apresenta o valor de 75 mm, que corresponde a penetração ideal por revolução completa, a taxa de penetração de campo resultou em um Fator de Perturbação de Instalação (Lutenegger *et al.*, 2014) de 3,0. Este valor é considerado um pouco superior às taxas típicas recomendadas pela indústria e foi obtido por causa da baixa capacidade do motor de torque da perfuratriz. Apesar disso, o efeito de cravação gerado pela maior taxa de rotação e a menor taxa de penetração não permitiu que a estaca atingisse maiores profundidades, o que resultou numa instalação de ancoragem rasa ($H_1/D_1 < 3$). Este procedimento tem a desvantagem de causar mais distúrbios do solo ao redor da estaca, o que pode reduzir sua capacidade de carga.

A profundidade atingida pelas hélices após a instalação, H_1 (hélice de topo), H_2 (hélice intermediária) e H_3 (hélice de ponta), bem como a relação entre H_1 e o diâmetro da hélice de topo D_1 , são mostradas na Tabela 4.1. A Tabela 4.2 mostra a profundidade em que cada seção instrumentada (S) foi localizada após a instalação, não sendo indicada a profundidade de S1, pois esta seção em nenhum dos ensaios ficou abaixo da superfície do terreno.

Tabela 4.1 – Profundidade das hélices após instalação.

Posição	H_1 (m)	H_1/D_1	H_2 (m)	H_3 (m)
A, D	1,04	2,97	1,80	2,55
B	0,84	2,40	1,60	2,35
C	0,57	1,63	1,33	2,08

Tabela 4.2 – Profundidade das seções instrumentadas após instalação.

Posição	S2 (m)	S3 (m)	S4 (m)	S5 (m)
A, D	0,97	1,18	1,24	2,48
B	0,77	0,98	1,04	2,28
C	0,50	0,71	0,77	2,01

4.3 Exumação da estaca após prova de carga

Após o Ensaio B, foi executado uma escavação manual de aproximadamente 1 m de profundidade para retirar amostras indeformadas do solo perturbado pela passagem das hélices e também do solo não perturbado. Na Figura 4.4 é possível perceber o solo perturbado devido a passagem das hélices, tanto acima quanto abaixo da hélice de topo (H_1). O diâmetro do cilindro do material perturbado acima e abaixo da hélice superior foi de aproximadamente 350 mm e 300 mm, respectivamente. Também é possível perceber a alteração no solo causada pelo ensaio DCP na parte esquerda da Figura 4.5.

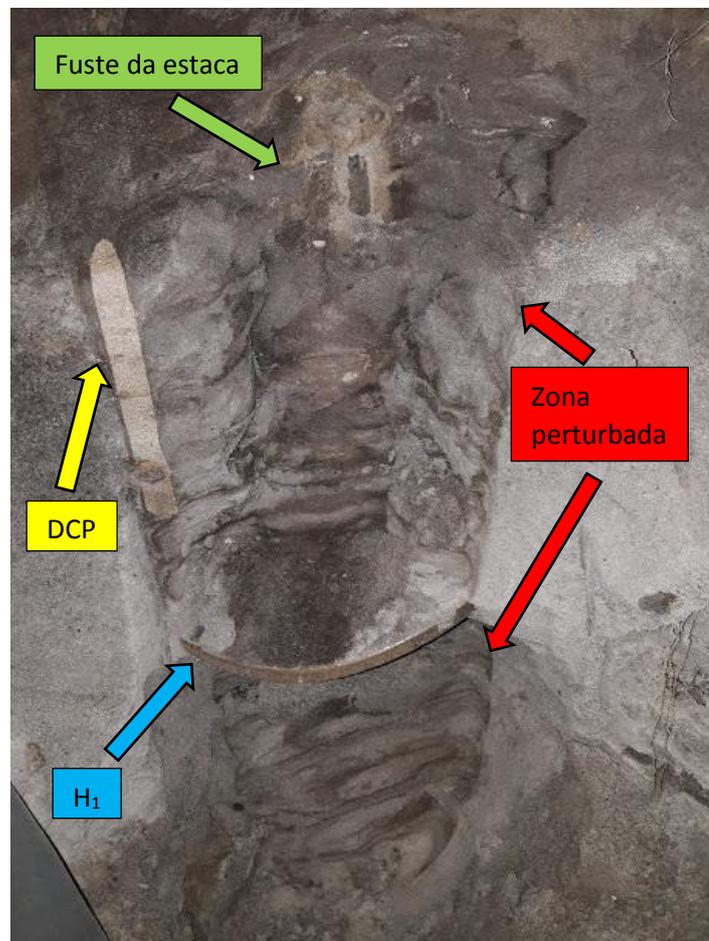


Figura 4.4 – Exumação após ensaio B.

4.4 Considerações sobre a perturbação no solo causada pela instalação da estaca

A partir dos resultados dos ensaios do DCP e GPR, analisaram-se as mudanças das propriedades de resistência do solo devido à passagem das hélices durante a instalação da estaca.

4.4.1. Resultados dos ensaios com o Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)

Os valores de números de golpes do ensaio DCP pré-instalação e pós-instalação da estaca nas posições A, B e C necessários para se atingir o critério de parada estabelecido previamente são mostrados na Tabela 4.3. A Figura 4.5 expressa a razão entre números de golpes do DCP antes da instalação e depois da instalação da estaca em função da distância do eixo da estaca helicoidal, nas três posições.

Tabela 4.3 – Valores de número de golpes no ensaio com DCP pré-instalação e pós-instalação da estaca.

		Posição A		Posição B		Posição C	
		Pré	Pós	Pré	Pós	Pré	Pós
	200	47	12	44	9	34*	4*
	300	47	25	42	19	53	28
Distância ao eixo da estaca (mm)	400	41	25	43	23	53	36
	500	39	28	42	26	53	40
	600	52	28	49	32	48	42
	700	38	26	41	34	58	46
	800	36	27	41	34	55	48

*Valores para a profundidade de 660 mm.

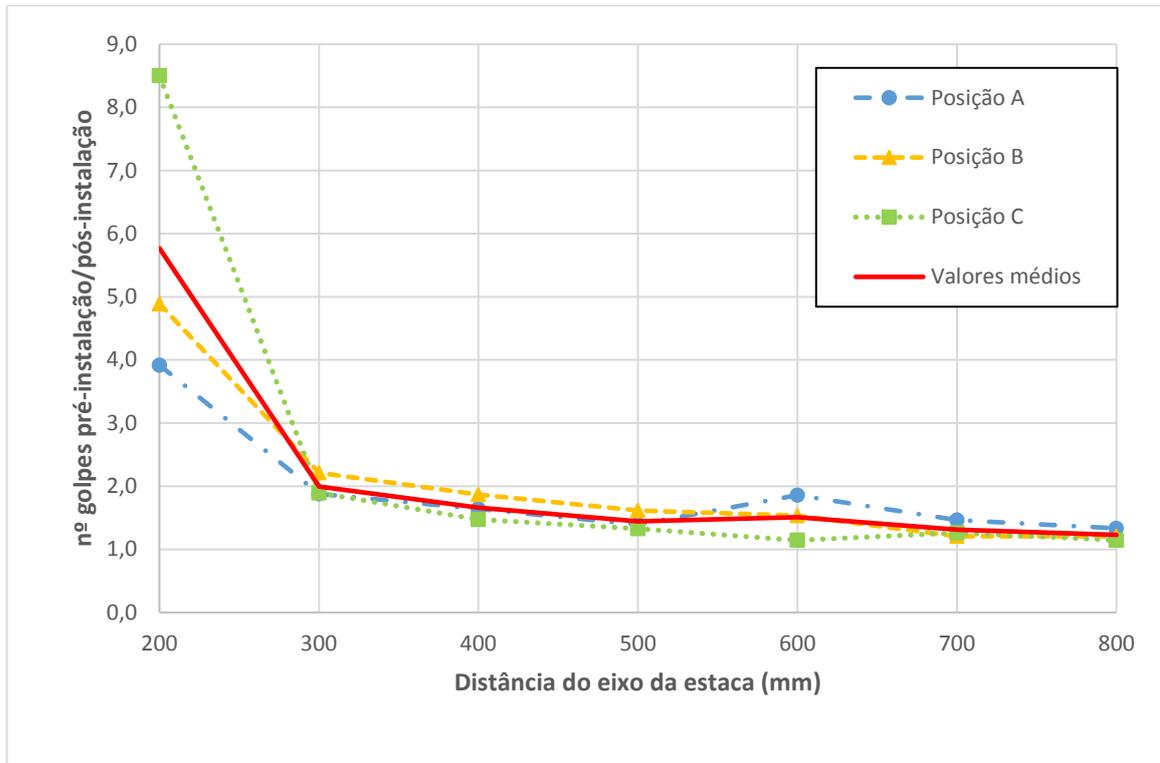


Figura 4.5 – Razão entre nº de golpes pré-instalação e pós instalação em função da distância do eixo da estaca.

Percebe-se que para a distância de 200 mm (menor distância analisada), a estaca que atingiu maior profundidade (Posição A) foi a que apresentou menor perda de resistência à penetração dinâmica enquanto que a maior perda de resistência à penetração dinâmica ocorreu para a estaca de menor profundidade (Posição C).

Na distância de 300 mm nota-se um comportamento semelhante entre as três posições de instalação da estaca helicoidal, sendo a razão entre o número de golpes pré-instalação e pós-instalação próximo a 2, indicando que a resistência a penetração dinâmica antes da instalação era o dobro da resistência após a instalação da estaca. Além disso, a partir do ponto de 300 mm constata-se uma diminuição praticamente constante da razão do número de golpes até a maior distância analisada de 800 mm.

Considerando a média das três posições, nota-se que a partir do ponto de 500 mm a perda de resistência é menor do que 50% da resistência antes da instalação neste ponto, chegando uma perda de cerca de 20% para o ponto de 800 mm. Portanto, é possível concluir que a resistência a penetração dinâmica do solo sofre uma diminuição devido ao processo de instalação da estaca e que esta perda

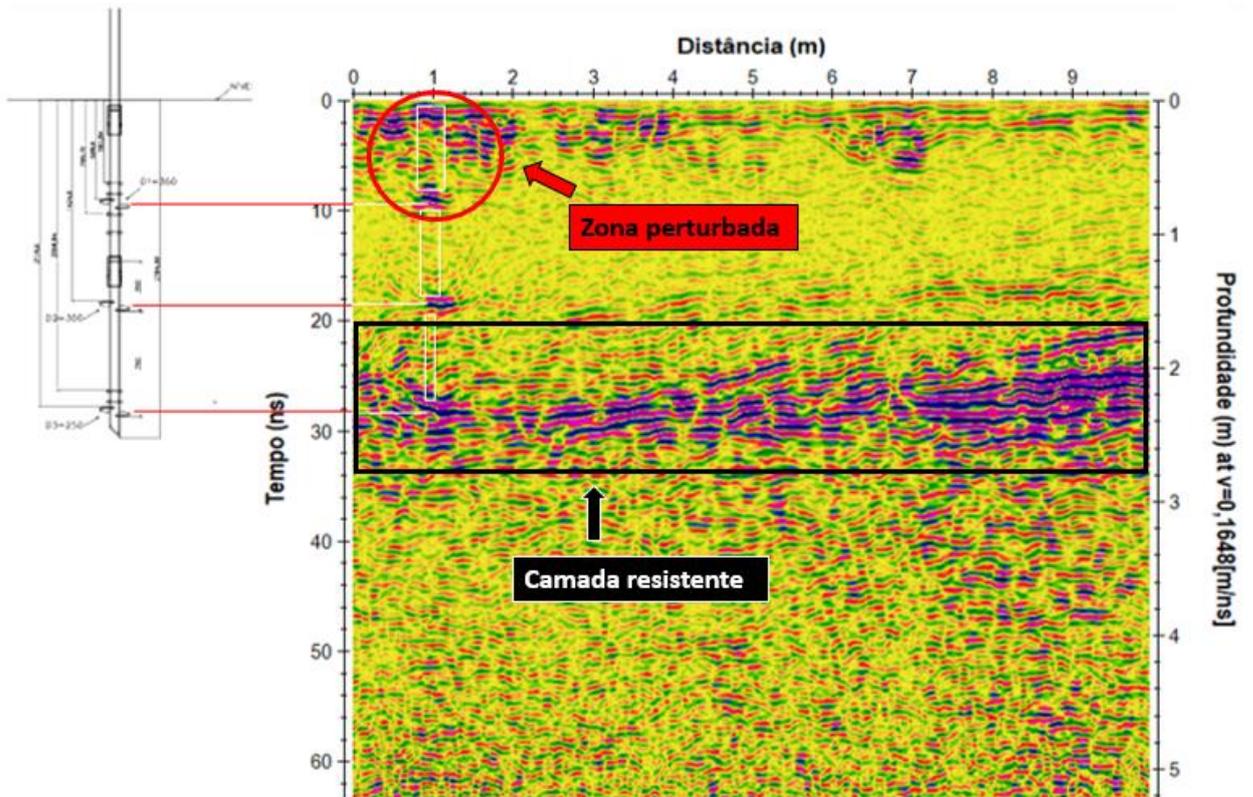
apresenta maior influência em uma zona com diâmetro de aproximadamente 3 vezes o diâmetro da hélice de topo.

4.4.2 Resultados dos ensaios com radar de penetração do solo (GPR)

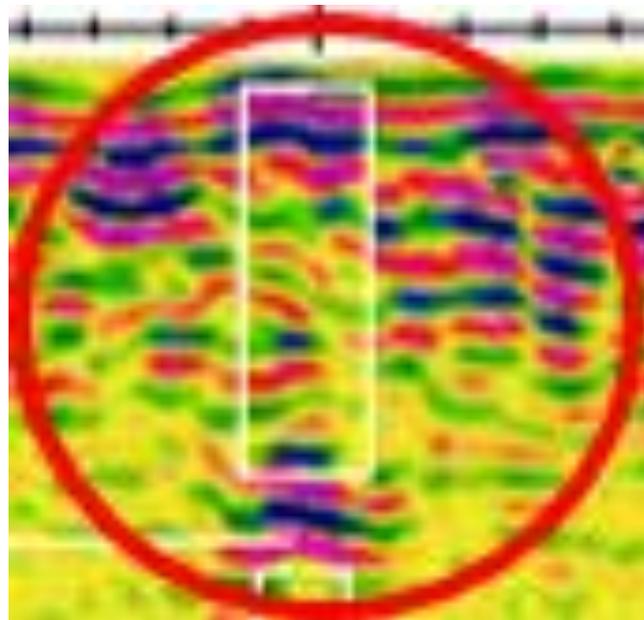
A Figura 4.6.a mostra o radagrama resultante do processamento de dados do GPR referente ao perfil 7 da Figura 3.18, sendo este o perfil mais próximo da estaca que foi possível fazer uma leitura contínua ao longo dos 10 m de comprimento da área de aquisição de dados. Este perfil está distante 100 mm em relação ao eixo da estaca helicoidal.

As diferentes condutividades elétricas do meio resultam em diferentes tonalidades na Figura 4.6.a. A condutividade afeta diretamente a atenuação da propagação das ondas de radar. As tonalidades claras (amarelo e verde) representam os meios nos quais as ondas geradas no GPR tiveram maior dificuldade de se propagar. Foi possível perceber que a partir da profundidade de 2 m, existe a presença de uma camada de solo com propriedades eletromagnéticas diferentes da areia pura encontrada acima dessa camada. Essa camada foi indicada na figura como uma camada resistente, devido ao fato da perfuratriz ter atingido seu torque máximo em torno dessa profundidade em todas instalações das estacas helicoidais desta pesquisa.

Além da posição das três hélices da estaca helicoidal (Figura 4.6.a) é possível perceber uma região de menor amplitude, logo acima da hélice de topo (indicada com o círculo vermelho e no detalhe da Figura 4.6.b). Esta região central possui padrão distinto do material do entorno, apresentado largura similar à da hélice de topo. Esse contraste sugere um material de menor compactação acima da hélice de topo, denotando ter havido perturbação do solo neste local. Com efeito, a rotação da estaca no processo de instalação causa uma perturbação do solo próximo à estaca, e além disso, após a instalação nota-se uma parcela do fuste próximo a superfície que apresenta pouco contato com o solo envolvente, fatores que aumentam o índice de vazios do solo desta região. Esta constatação está de acordo com os resultados obtidos com o DCP, quanto a mudança de propriedades do solo da superfície próximo à estaca helicoidal.



a)



b)

Figura 4.6 – (a) Radagrama referente ao perfil 7 (adaptado de Lima Filho, 2017); (b) detalhe ampliado da zona perturbada.

4.5 Medições do torque de instalação da estaca helicoidal

A partir das duas seções instrumentadas para torque S1 e S4, foi possível obter o torque de instalação da estaca helicoidal. Devido a problemas na leitura das deformações das seções instrumentadas durante a primeira instalação na Posição A (Figura 3.1), não foi possível determinar o torque desta instalação. As Figuras 4.7 a 4.9 mostram o torque medido na Seção 1 e na Seção 4 em função do tempo, durante a instalação do último segmento da estaca, onde foi possível medir os valores máximos de torque de instalação nas Posições B, C e D (Figura 3.1).

Percebe-se nos gráficos de torque alguns valores positivos devido a rotação no sentido contrário da instalação, ocasionando maior perturbação do solo. Além disso, o torque máximo obtido durante as instalações foi de 7,8 kN-m, 16% inferior ao torque nominal máximo indicado pelo fabricante da perfuratriz.

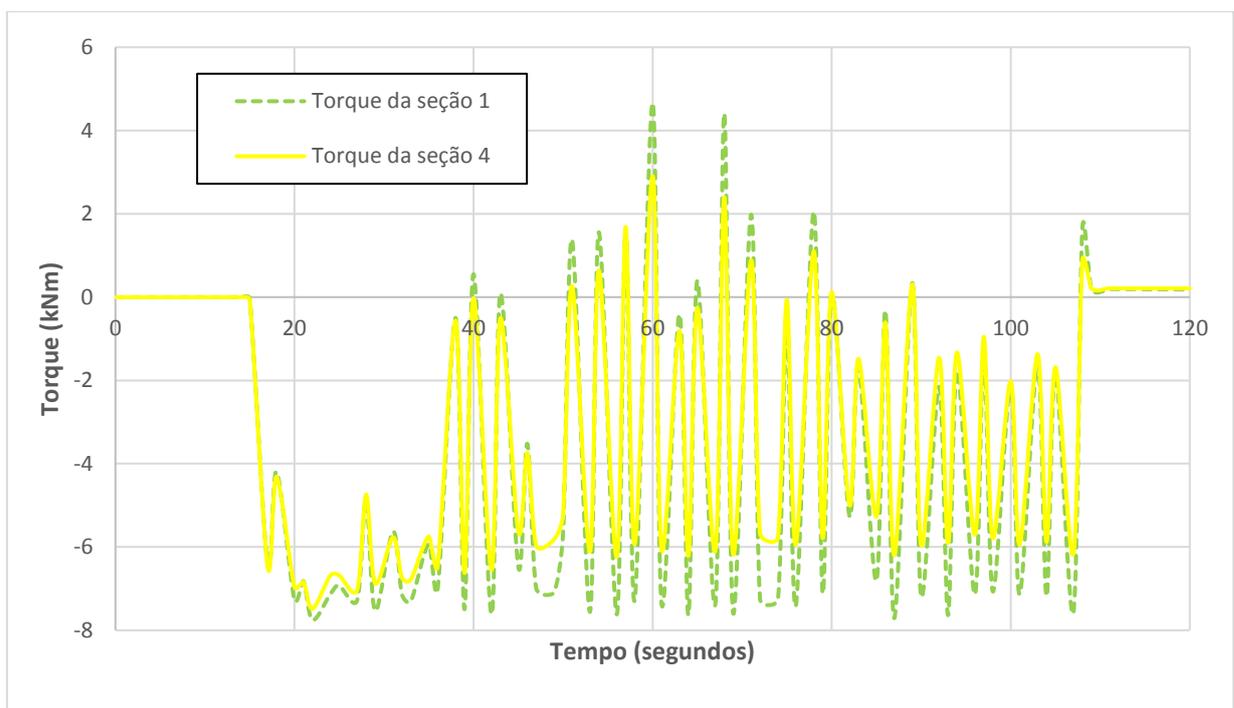


Figura 4.7 – Torque de instalação na Posição B.

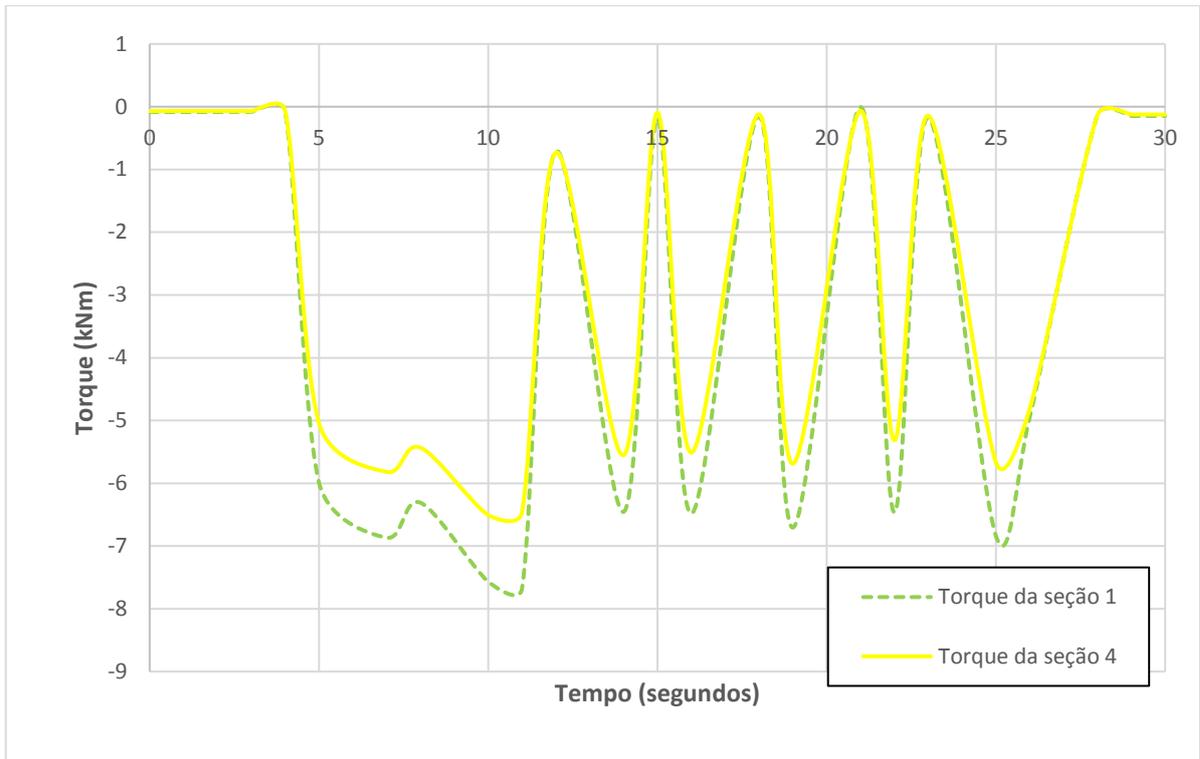


Figura 4.8 – Torque de instalação na Posição C.

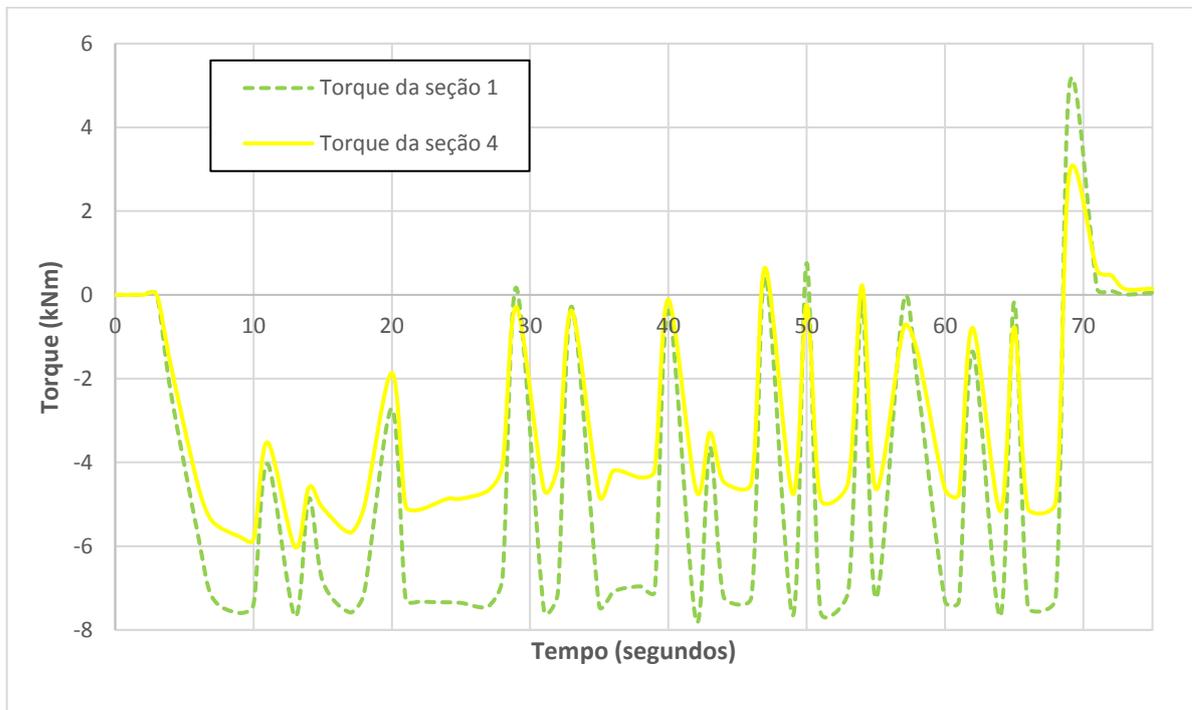


Figura 4.9 – Torque de instalação na Posição D.

A partir dos dados obtidos durante as instalações instrumentadas, foram definidos os seguintes torques representativos:

- Total: é o torque na Seção S1, obtido pela instrumentação.
- Fuste + H₁: é a parcela de torque necessário para a penetração da hélice H₁ e do fuste compreendido entre as Seções S1 e S4, determinado pela subtração do torque na Seção S1 pelo torque da Seção S4, obtidos pela instrumentação.
- H₂ + H₃: é a parcela de torque necessário para a penetração das hélices H₂ e H₃ e o trecho de fuste da ponta da estaca até a Seção S4. Obtido pela instrumentação da seção S4.

Os valores de torque representativos são mostrados na Tabela 4.4. Os valores são a média dos torques no último segmento da estaca instalado. Nota-se que o trecho das hélices H₂ e H₃ foi responsável pela maior parcela do torque de instalação. Percebe-se também que em média o trecho do fuste com a hélice H₁ representa 23% do torque total de instalação, que pode ser justificado pelo fato do solo acima da hélice superior apresentar maior grau de perturbação.

Tabela 4.4 – Torques representativos de instalação, total e parcelas obtidas pela instrumentação (kNm).

Posição	Total	Fuste + H₁	H₂ + H₃
B	7,5	1,3	6,2
C	7,0	1,4	5,6
D	7,6	2,5	5,1
Média	7,4	1,7	5,6

4.6 Resultados das provas de Carga Estática

Duas provas de carga estática foram realizadas na estaca helicoidal no campo experimental da pesquisa de acordo com as características descritas no item 3.7.1 e foram denominadas de Ensaio A e Ensaio B. As curvas de carga-deslocamento das provas de carga estática são mostradas nas Figuras 4.10 e 4.11.

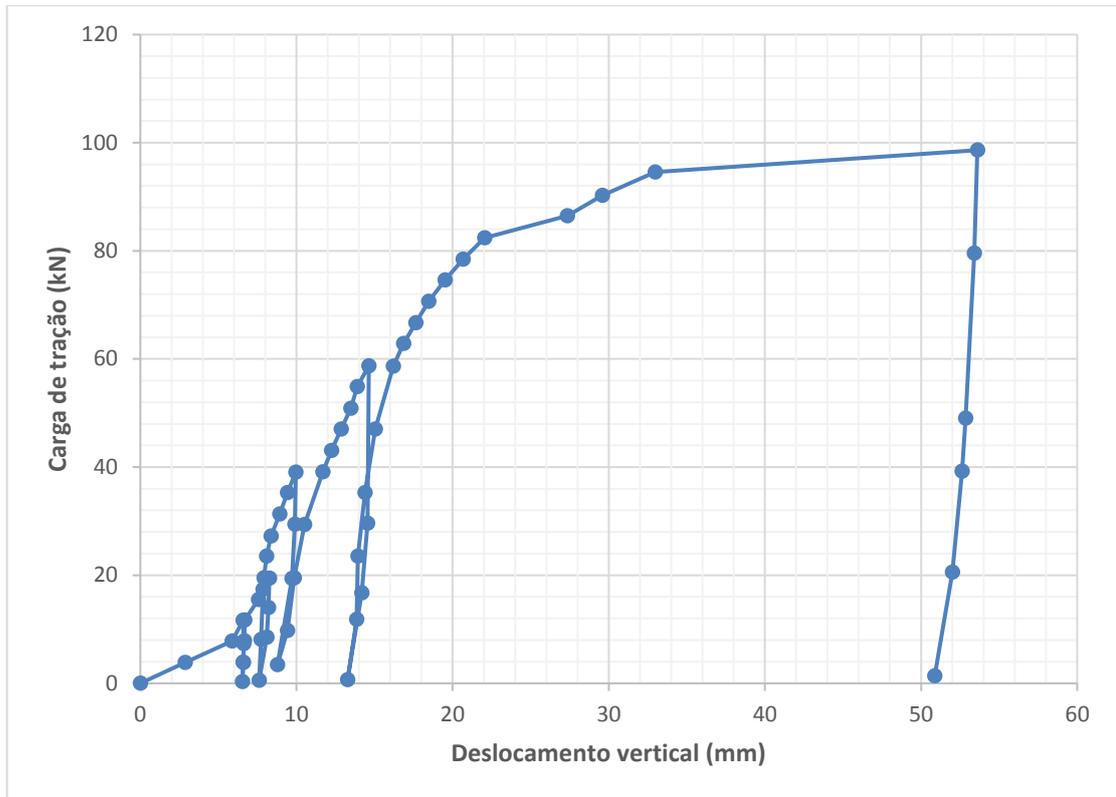


Figura 4.10 – Curva carga-deslocamento do Ensaio A.

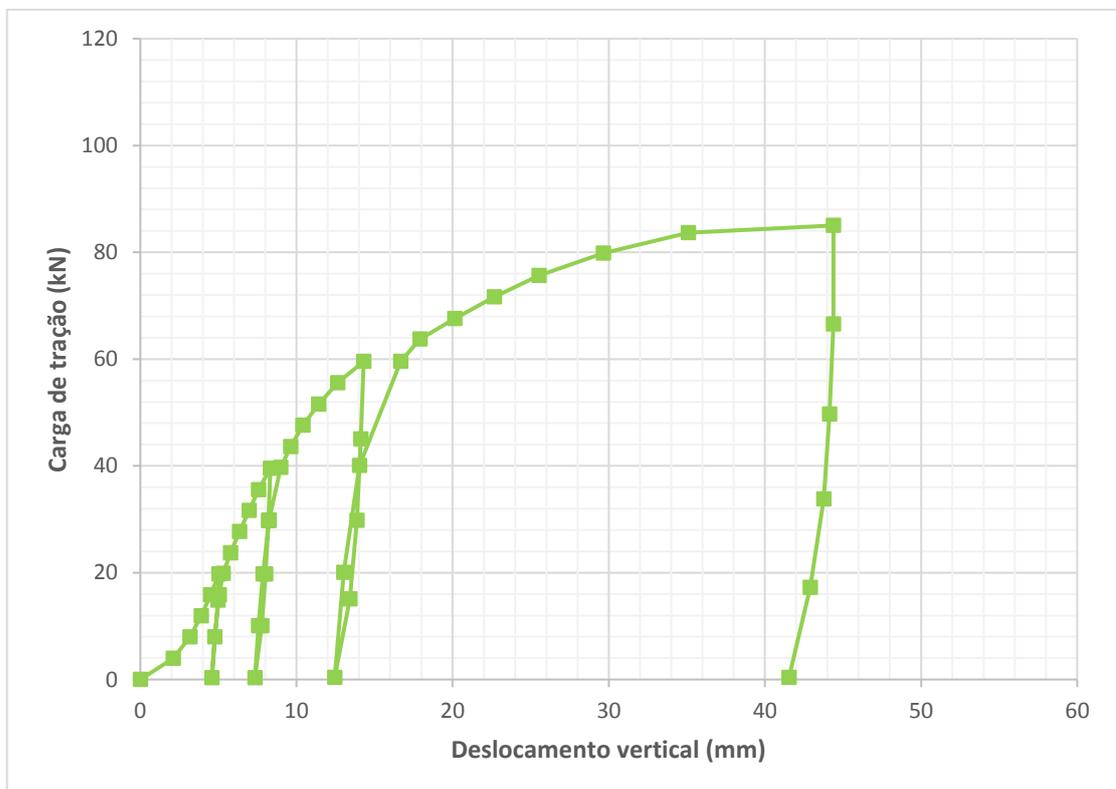


Figura 4.11 – Curva carga-deslocamento do Ensaio B.

Os dois ensaios são representados na Figura 4.12 por suas respectivas envoltórias, formadas pelos pontos de máxima carga atingida em cada ciclo de carga. Observa-se que tanto no Ensaio A quanto no Ensaio B ocorreu ruptura física.

A capacidade de carga à tração foi determinada de acordo com o AC 308 (ICC-ES, 2007), definida como a carga atingida quando ocorre um acentuado deslocamento vertical e é representada como o ponto mais alto da curva carga-deslocamento. O valor médio da capacidade de carga à tração foi de 92 kN. Os valores obtidos para cada ensaio são mostrados na Tabela 4.5.

A Figura 4.12 também mostra a reta originada do método de Davisson, em que a capacidade de carga é definida como a carga correspondente ao deslocamento líquido da estaca igual a 10% do diâmetro médio das hélices. Essa condição tem sido usada em trabalhos como Zhang (1999) e Tsuha (2007), sendo considerado um método padrão na indústria (Hubbell Power Systems, 2014). Devido as variações de condição de instalação e de solo, as curvas apresentam formatos diferentes, resultando em diferentes cargas para as quais a curva carga-deslocamento cruza a reta do Método de Davisson.

A capacidade de carga das curvas ($Q_{u,curva}$), o correspondente deslocamento na ruptura (U_u), o deslocamento relativo (razão entre o deslocamento e o diâmetro médio das hélices, U_u/D_{med}) e a capacidade de carga obtida do método de Davisson, são mostrados na Tabela 4.5. Os resultados mostraram boa aproximação entre os dois métodos de interpretação para determinação da capacidade de carga à tração, com diferenças percentuais de 8% para o Ensaio A e 6% para o Ensaio B.

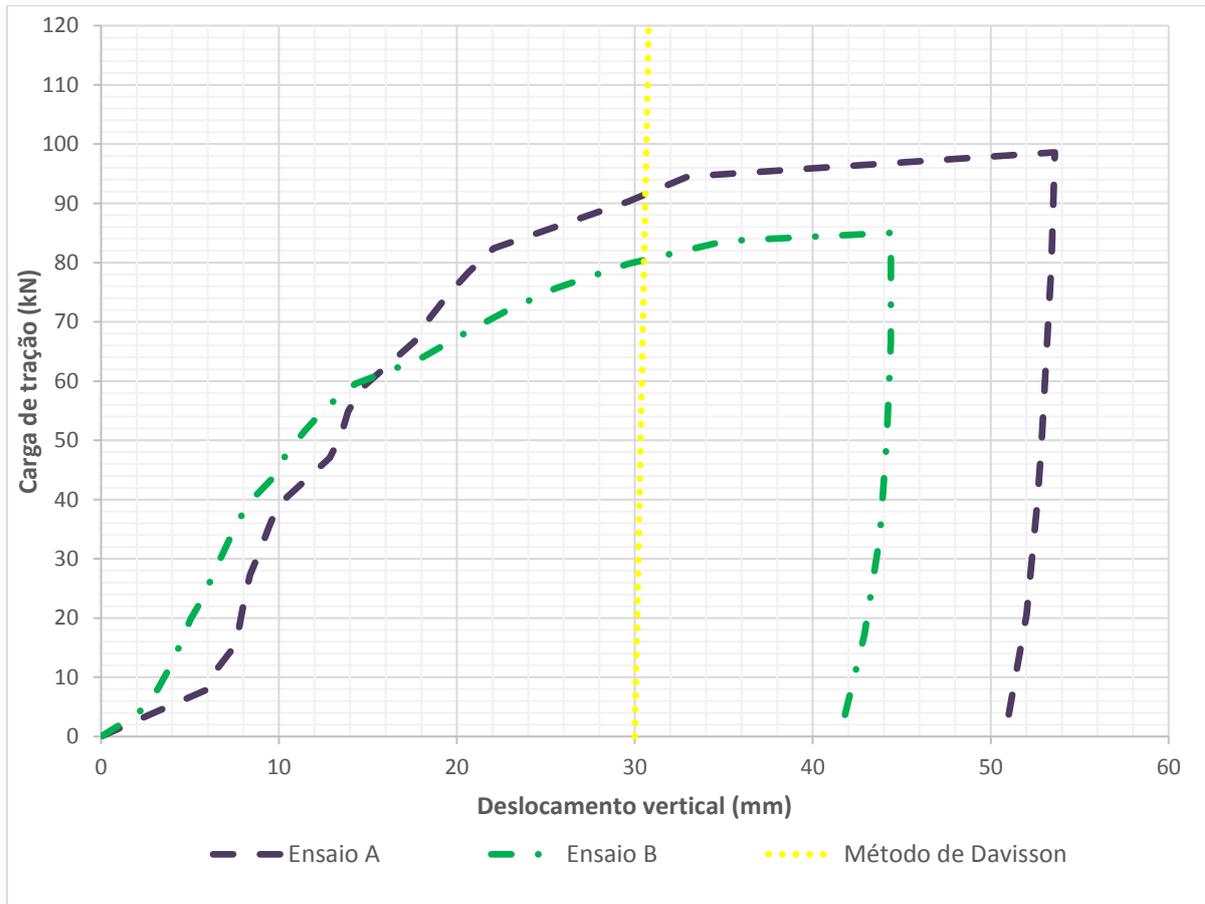


Figura 4.12 – Envoltórias de carga-deslocamento dos Ensaios A e C.

Tabela 4.5 – Capacidade de carga da estaca helicoidal Q_u .

Ensaio	$Q_{u,curva}$ (kN)	U_u (mm)	U_u/D_{med}	$Q_{u,Dav}$ (kN)	$Q_u / Q_{u,Dav}$
A	99	46	0,15	92	1,08
B	85	40	0,13	80	1,06
Média	92	43	0,14	86	1,07

4.7 Previsão da capacidade de carga à tração

As capacidades de carga das estacas foram estimadas a partir das propriedades do solo obtidas por Costa (2017b) e das profundidades de instalação, usando-se o método do cisalhamento cilindro (CC) e o métodos das capacidades individuais (CI) (as equações para cada método foram apresentadas no Capítulo 2). As capacidades de carga estimadas são mostradas na Tabela 4.6, juntamente com as capacidades de carga obtidas pelas provas de carga.

Tabela 4.6 – Resultados de campo e capacidades de carga estimadas.

Ensaio	$Q_{u,curva}$ (kN)	$Q_{u,cc}$ (kN)	$Q_{u,ci}$ (kN)
A	99	61	108
B	85	26	77

Percebe-se que o método do cisalhamento cilíndrico subestimou bastante a capacidade de carga obtida na prova de carga, enquanto que o método das capacidades individuais apresentou valores mais próximos dos obtidos nos ensaios de campo, apesar de no Ensaio A este método ter superestimado em 8% a capacidade de carga experimental.

4.8 Resultados da instrumentação para medições de carga axial

A resposta da instrumentação foi obtida por sistema de aquisição de dados a uma taxa de um ponto a cada um segundo. Em seguida, procedeu-se a sincronização e tratamento estatístico das medidas realizadas. Os resultados da instrumentação de medições de carga axial dos ensaios A e B são mostrados nas Figuras 4.13 a 4.16. Nas Figuras 4.13 e 4.14 apresentam-se os resultados de carga de tração e deslocamento vertical ao longo do tempo, indicando-se também todos os ciclos de carga e descarga. As Figuras 4.15 e 4.16 mostram as respectivas envoltórias dos ensaios A e B.

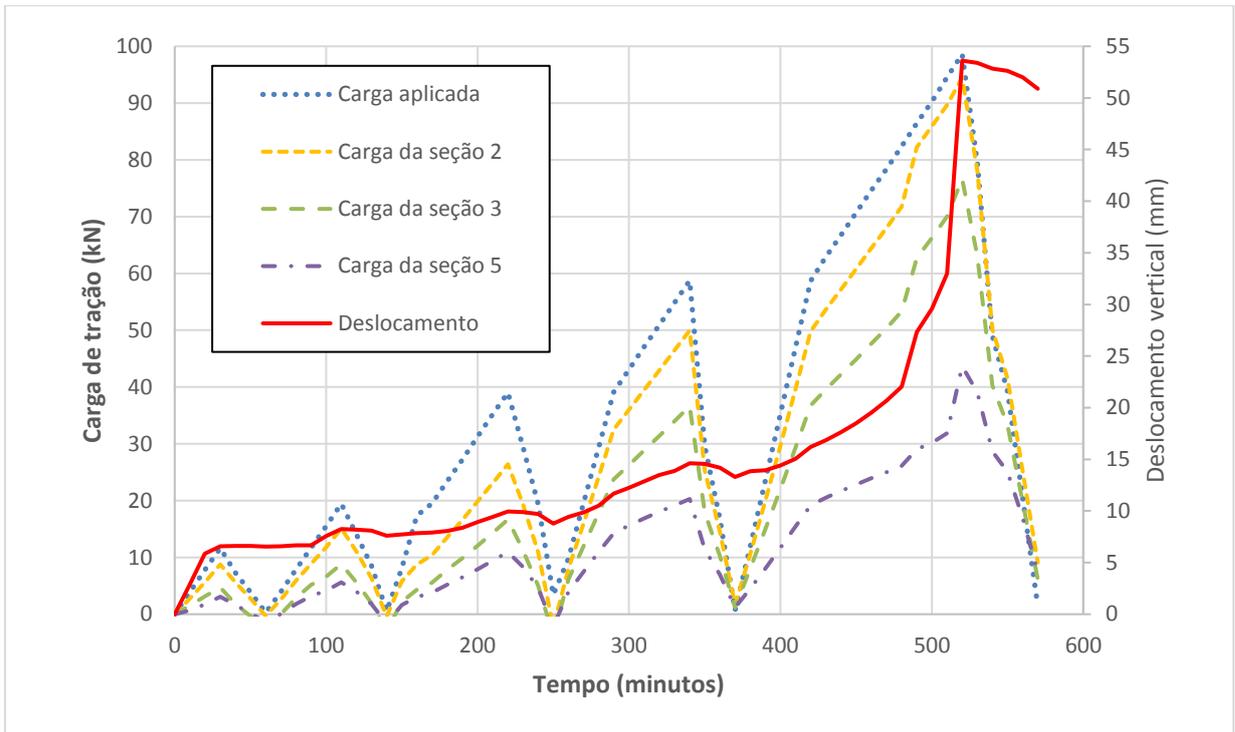


Figura 4.13 – Curvas de carga-tempo-deslocamento da instrumentação do Ensaio A.

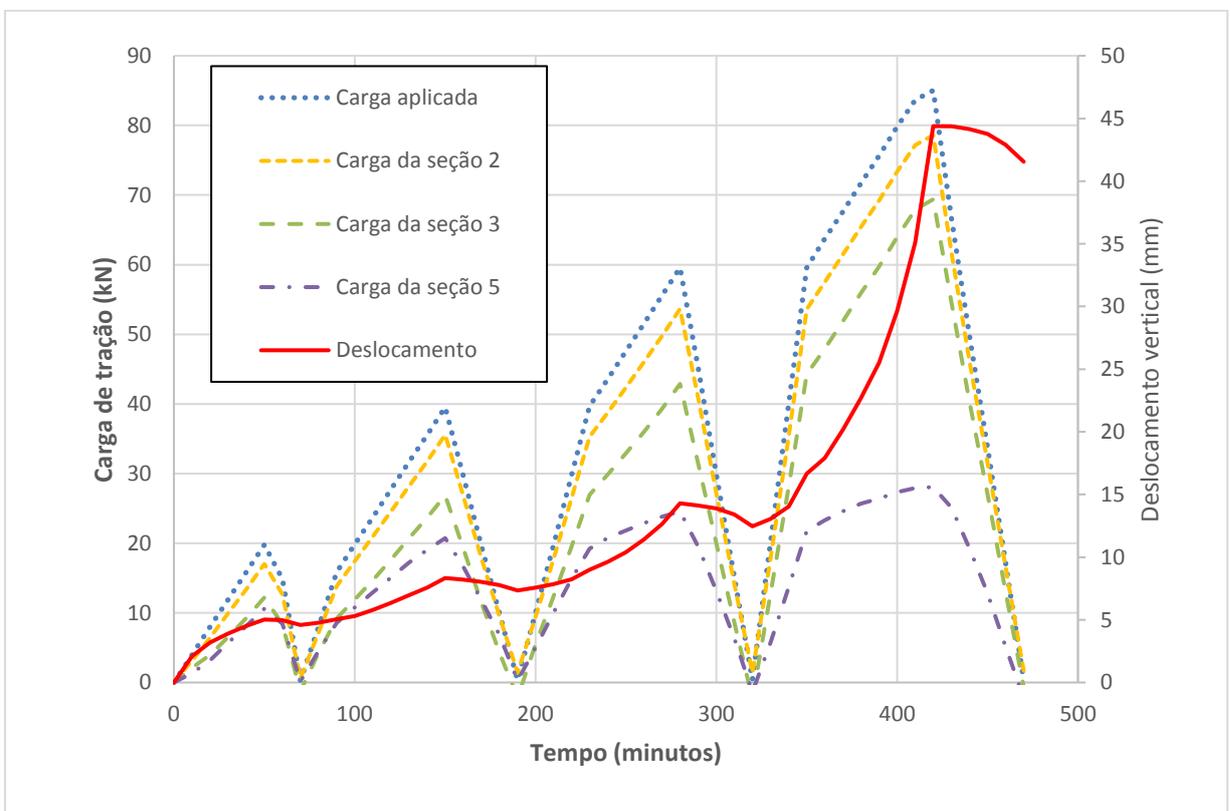


Figura 4.14 – Curvas de carga-tempo-deslocamento da instrumentação do Ensaio B.

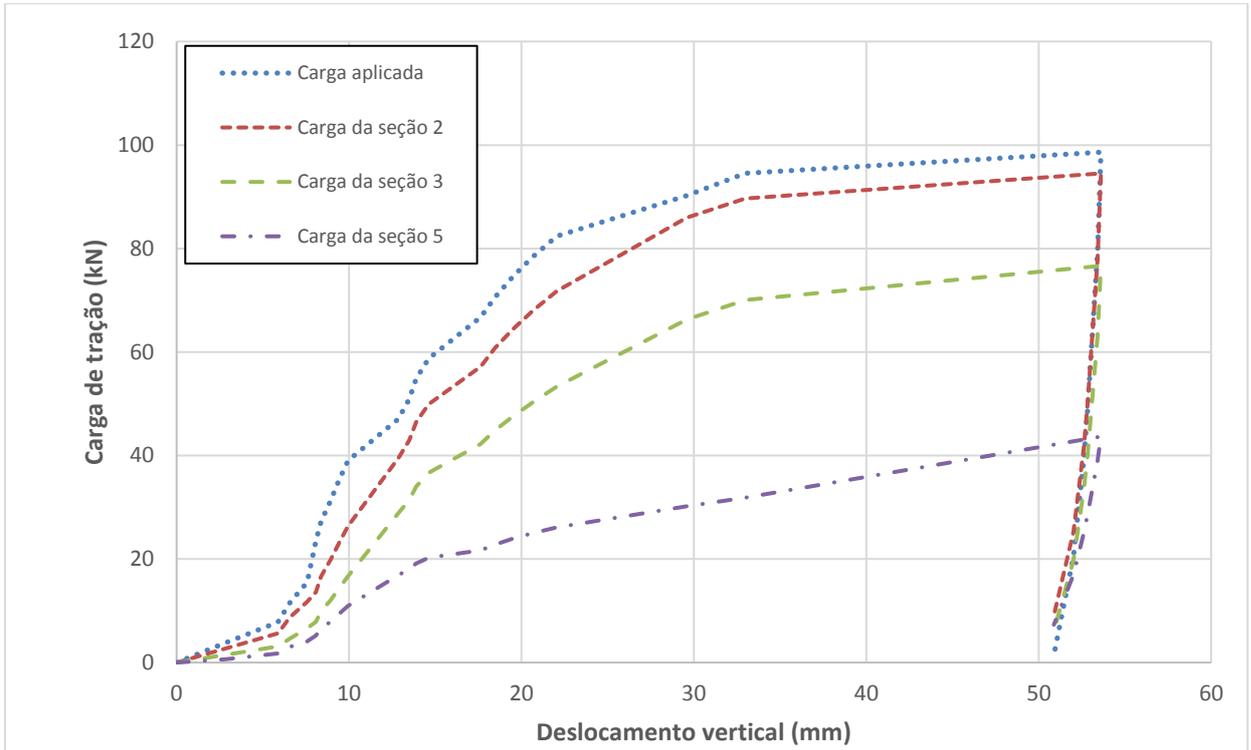


Figura 4.15 – Envoltórias de carga-deslocamento da instrumentação do Ensaio A.

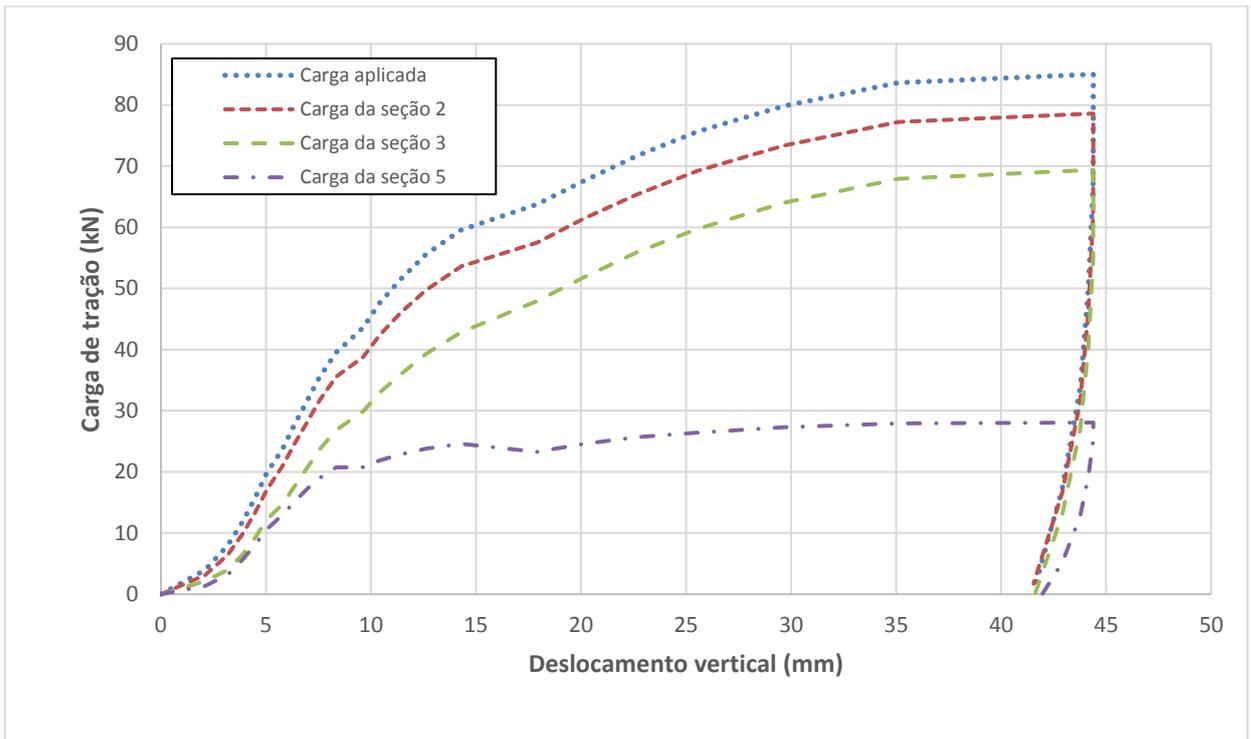


Figura 4.16 – Envoltórias de carga-deslocamento da instrumentação do Ensaio B.

4.8.1 Diagramas de transferência de carga

Os diagramas de transferência de carga são apresentados na Figura 4.17 e Figura 4.18.

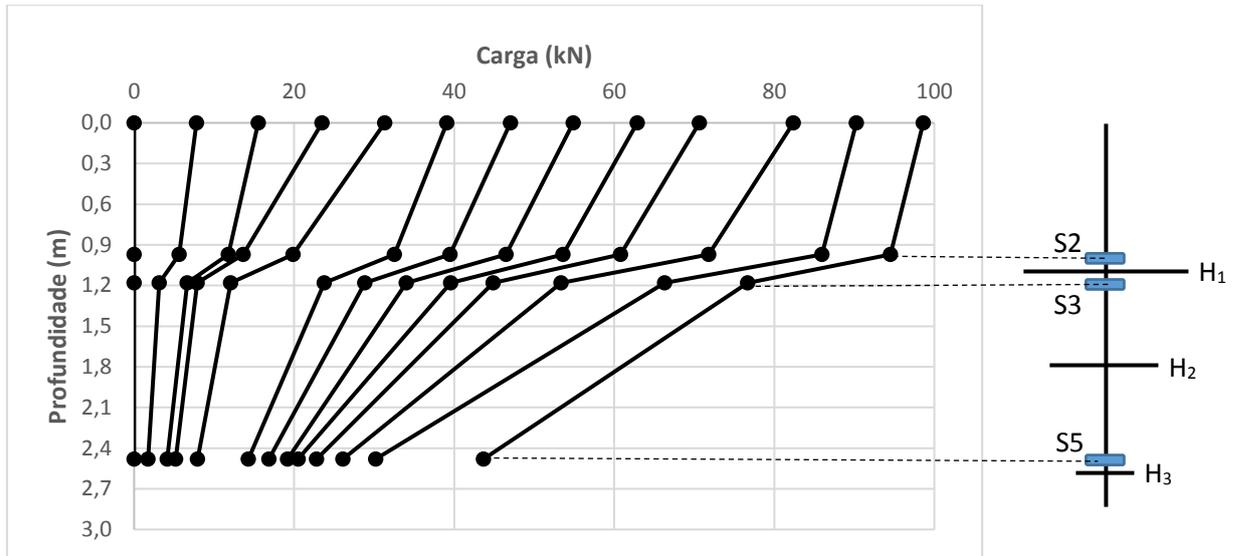


Figura 4.17 – Diagrama de transferência de carga para o Ensaio A.

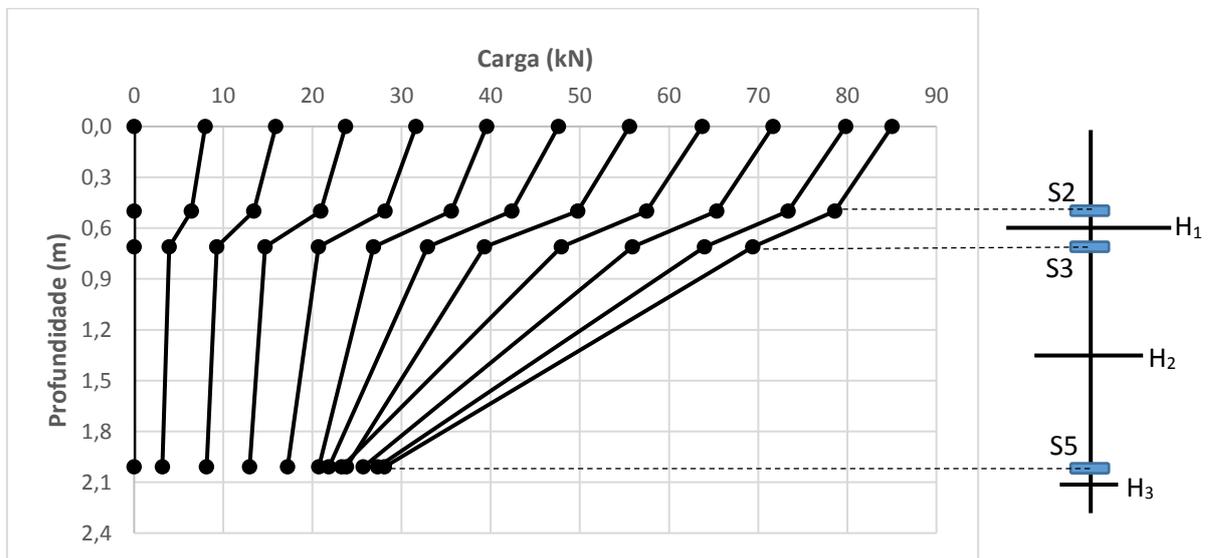


Figura 4.18 – Diagrama de transferência de carga para o Ensaio B.

Para o ensaio A, nos deslocamentos iniciais a contribuição de resistência do fuste superior chega a 42% do total da carga, entretanto, nos deslocamentos finais, ocorre uma melhoria nas propriedades do solo entre as hélices, ocasionando uma diminuição para cerca de 4% da contribuição do fuste superior na carga máxima atingida no ensaio.

Para o ensaio B, nos deslocamentos iniciais a contribuição de resistência do fuste superior atinge no máximo 20%, devido a estaca apresentar menor área de fuste superior se comparado com o ensaio A. Observa-se também o mesmo aumento de contribuição da resistência das hélices devido a melhoria das propriedades do solo com o aumento dos deslocamentos.

Além disso, nota-se que a maior parcela da carga é resistida pelas hélices (mais de 90%), algo que era esperado, devido as estacas apresentarem condição de ancoragem rasa.

As capacidades de carga obtidas são apresentadas na Tabela 4.7, sendo definidas como a carga que provoca um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio das hélices acrescido da deformação elástica da estaca, neste caso, 30,5 mm.

De acordo com a Tabela 4.7, observa-se que a contribuição da hélice de ponta juntamente com a hélice intermediária representa quase 80% da carga resistida pela estaca para as cargas últimas convencionadas. Isso pode ser justificado pelo fato do solo próximo a essas hélices sofrem menor perturbação se comparado com o solo próximo a hélice de topo.

Tabela 4.7 – Capacidades de carga total e parcelas obtidas com a instrumentação (valores em kN).

Ensaio	Total¹	Fuste superior²	H₁³	H₂ + Fuste⁴	H₃⁵
A	92	4	19	34	35
B	80	6	10	37	27
Média	86	5	15	35	31

Nota:

- 1) carga total aplicada na cabeça da estaca, medida pela célula de carga.
- 2) carga resistida por atrito lateral no fuste acima da hélice de topo, dada pela subtração da carga total pela carga na seção S2.
- 3) carga correspondente a hélice H₁, obtida subtraindo-se a carga na seção S2 pela carga na seção S3.
- 4) carga resistida pela hélice H₂ mais o fuste compreendido entre as seções S3 e S5, determinada pela subtração da carga na seção S3 pela carga da seção S5.
- 5) carga na hélice de ponta H₃, obtida na seção S5.

4.8.2 Desenvolvimento do atrito lateral

A partir da instrumentação fixada na seção S2, determinou-se a distribuição do atrito lateral no fuste superior da estaca nos dois ensaios realizados (Figura 4.19). Para determinação da área lateral considerou-se, além do diâmetro externo do tubo, o comprimento efetivo L_{ef} , que é o comprimento do fuste da estaca acima da hélice do topo (H_1) até a superfície do terreno subtraído do diâmetro da hélice do topo. Esse procedimento, recomendado por Zhang (1999), é para levar em conta a influência desta hélice na redução do atrito lateral do fuste.

O valor do atrito lateral no deslocamento correspondente à carga de ruptura convencionada foi de 28 kPa para o ensaio A e 129 kPa para o ensaio B. O atrito lateral no ensaio B foi 4,6 vezes superior ao do ensaio A. A Figura 4.19 mostra ainda que os maiores valores da resistência por atrito lateral no ensaio A ocorreram para deslocamentos inferiores ao deslocamento convencionado. Nota-se também que ocorreu uma tendência de estabilização do crescimento do atrito lateral no ensaio B, para deslocamentos superiores a 18 mm. Além disso, como após a instalação da estaca helicoidal no terreno a parcela do fuste próximo a superfície tem pouco contato com o solo envolvente, o cálculo da área de contato da estaca de ambos os ensaios pode não corresponder a realidade.

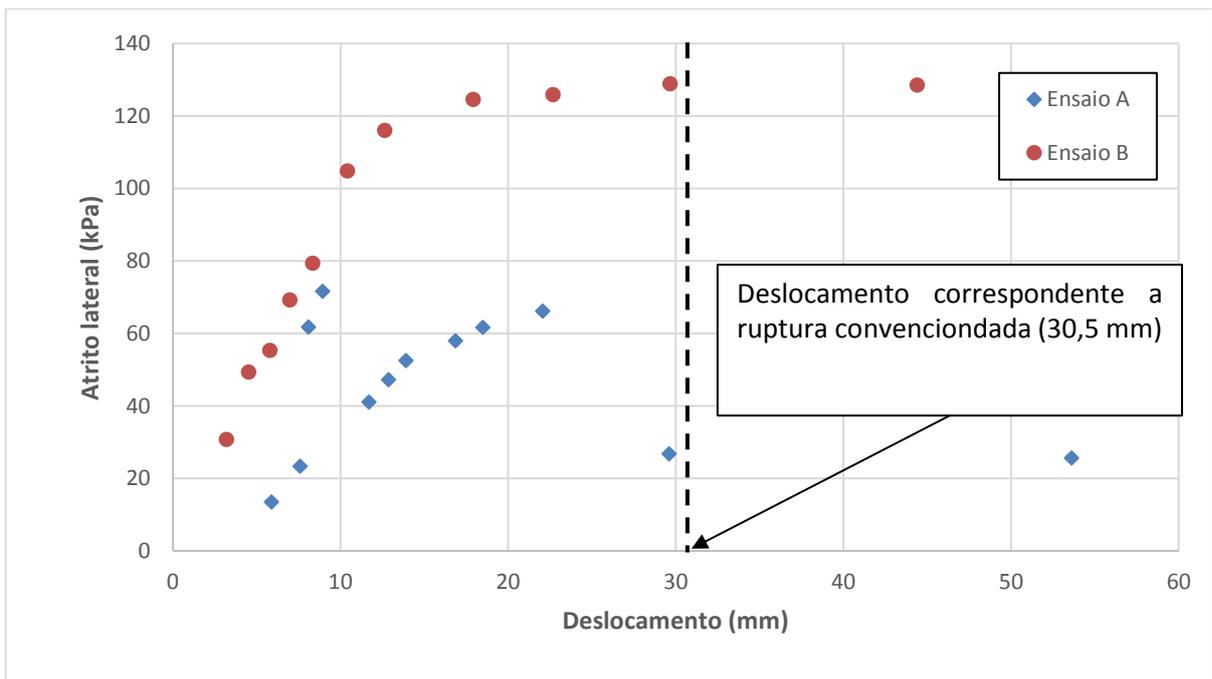


Figura 4.19 – Diagrama de atrito lateral nos Ensaios A e B.

4.9 Valores do fator de torque (K_T) das estacas instrumentadas

Com os torques e cargas apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.7, respectivamente, foram calculados os fatores de torque da estaca instrumentada. O fator de torque é a razão entre a capacidade de carga e o torque final de instalação. Ou seja, relaciona duas medidas de resistência, tomadas após e durante a instalação da estaca, respectivamente. A Tabela 4.8 apresenta fatores de torque calculados no ensaio B para dois trechos da estaca entre as seções instrumentadas. O primeiro trecho engloba o fuste e a hélice H_1 , enquanto que o segundo trecho inclui as hélices H_2 e H_3 , além do fuste entre elas.

Santos Filho (2014), obteve valores de fator de torque de $15,9 \text{ m}^{-1}$ e $10,7 \text{ m}^{-1}$, para duas estacas instaladas em solo tropical da região de São Carlos/SP de seção guia com diâmetro de fuste de 73,0 mm. Estes valores são próximos do fator de torque total obtido no ensaio B desta pesquisa, de $11,4 \text{ m}^{-1}$. Santos Filho (2014) menciona valores reportados por Hoyt e Clemence (1989), AC 358 (ICC-ES, 2007) e Perko (2009) em média duas vezes superiores, obtidos em solos de regiões de clima temperado. Os resultados de Santos Filho (2014), juntamente com os da presente pesquisa, sugerem que solos tropicais poderiam ser mais influenciados pela instalação da estaca, oferecendo, portanto, menor K_T .

Tabela 4.8 – Fatores de torque (K_T), em m^{-1} .

Ensaio	Total	H_1	$H_2 + H_3$
B	11,4	7,1	11,4

Nos cálculos de K_T para H_1 , apresentados na Tabela 4.8, há uma pequena contribuição do fuste entre as seções S1 e S4 na medição do torque. Porém, pela magnitude do torque medido, de 1,4 kNm (ver Tabela 4.4), assume-se que esta contribuição foi pequena e, portanto, não afeta significativamente os resultados.

O resultado de K_T combinado das duas hélices inferiores ($K_T - H_2+H_3$) foi 61% superior ao da hélice superior ($K_T - H_1$). Utilizando uma estaca de quatro hélices, Santos Filho (2014) obteve resultados de K_T combinado das três hélices inferiores 130% maior que o da hélice superior. O K_T médio para as duas hélices inferiores obtido no presente trabalho é de $5,7 \text{ m}^{-1}$, enquanto que o médio para as três hélices inferiores

obtido por Santos Filho (2014) foi de aproximadamente $6,4 \text{ m}^{-1}$. Tanto no ensaio do presente trabalho quanto nos testes de Santos Filho (2014), a hélice superior forneceu maior fator de torque. Esta constatação não corrobora a hipótese de hélices superiores, por estarem em solo mais perturbado, fornecerem fatores de torque menores que os das hélices inferiores, que repousariam em solo menos perturbado.

Na hipótese da perturbação provocada pela instalação da estaca reduzir mais o torque que a capacidade de carga associados à cada hélice, o fator de torque correspondente tenderá a ser maior nas hélices mais acima e menor nas hélices mais abaixo. Ademais, durante a cravação das estacas no presente trabalho, verificou-se um descolamento entre o solo e o fuste próximo à superfície do terreno. Esse descolamento é um componente de perturbação com potencial de afetar mais o torque que a resistência ao arrancamento, e, eventualmente, causar aumento de K_T nas hélices superiores em relação às inferiores.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Comparando-se os resultados das provas de carga à tração com os métodos de previsão de capacidade de carga, percebeu-se que o método das capacidades de cargas individuais apresentou resultados mais próximos dos valores de campo que o método do cilindro de cisalhamento.

As análises de transferência de carga permitiram concluir que, para as cargas convencionadas de ruptura, a contribuição das hélices para a resistência global foi superior a 90%. Para pequenas cargas, a contribuição do fuste é maior do que para as cargas de ruptura. Além disso, com aumento dos deslocamentos durante a prova de carga, ocorre uma melhoria nas propriedades do solo entre as hélices, favorecendo o aumento de contribuição das resistências das hélices, principalmente das hélices de ponta e intermediária, onde o solo apresenta menor perturbação se comparado com a hélice de topo.

O fator de torque determinado nesta pesquisa foi compatível com os de Santos Filho (2014), obtidos em solo transportado tropical e aproximadamente metade dos valores reportados na literatura para estacas de mesmo diâmetro de fuste, indicando que os solos de clima tropical poderiam ser mais influenciados pela instalação da estaca, se comparados com solos de clima temperado. Além disso, a separação dos fatores de torque para cada hélice da estaca indicou que o fator de torque da hélice de topo é superior aos fatores de torque da hélice intermediária e de ponta. Uma explicação para isto seria que a perturbação do solo causada pelo processo de instalação da estaca afetou mais o torque do que a capacidade de carga associados a cada hélice.

Os resultados obtidos com o Penetrômetro Dinâmico de Cone mostraram que há diminuição de resistência do solo próximo à superfície devido a instalação da

estaca, a qual abrange uma área de influência com diâmetro estimado em aproximadamente três vezes o diâmetro da hélice de topo.

Com a técnica do GPR foi possível identificar uma região acima da hélice de topo com propriedades eletromagnéticas diferentes do solo do entorno, sugerindo uma maior perturbação do solo causada pela instalação da estaca nesta região. Esta constatação ratifica os resultados obtidos com o DCP. Essas duas técnicas podem ser complementares na identificação de mudanças nas propriedades do solo devido ao processo de instalação de estacas helicoidais.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Para futuras pesquisas em fundações em estacas helicoidais recomenda-se:

- Realizar ensaios em maior número com medição simultânea de torque de instalação e esforço axial durante provas de carga à tração.
- Instrumentar a estaca helicoidal para medição de esforço de flexão e analisar as respostas da instrumentação para a estaca submetida a carregamentos laterais.
- Realizar ensaios cíclicos quase-estáticos e dinâmicos com estacas instrumentadas.
- Realizar ensaios de prova de carga à compressão com estaca instrumentada e comparar com os resultados obtidos nas provas de carga à tração.

Referências Bibliográficas

A.B. Chance CO. (2014). "Technical design Manual ed.3". ATLAS, Hubbel, 414p.

Aegrupo. (2018). Disponível em: <https://www.aegrupo.com.br>. Acessado em 27/07/2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 17p.

ASTM International. (2013). D3689M-07 e1, Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2011). D6432-11, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2015). D6951 / D6951M-09. Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Costa, G. F. (2017a). Análise da zona de perturbação causada pela instalação de estacas helicoidais em solo arenoso. Artigo científico (graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil. Natal – RN. 19p.

Costa, J. P. S. (2017b). Uplift behaviour of helical piles in sand subjected to cyclic loading. Master's Thesis – Department of Civil Engineering, Centre of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte. 106 pp.

Clemence, S. P. e Lutenegger, A. J. (2015). Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute, 9(1), pp. 21-41.

CZM Foundation Equipment. (2012). MC150: Technical Specifications. São Paulo.

Das, B.M. (1990). Earth Anchors. Developments in Geotechnical Engineering, nº 50. New York: Elsevier. 242 p.

Excel Sensores. (2018). Disponível em: <http://www.excelsensor.com.br>. Acessado em 18/01/2018.

Geotechnical. (2018). Disponível em: <http://geotechnical.com.br>. Acessado em 27/07/2018.

Gusmão Filho, J. A. (1982). Prática de fundações nas capitais nordestinas. IN: VII congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações. Olinda. Anais do. Recife: ABMS. V. I. p.189-206.

Hoyt, R.M. e Clemence, S.P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, v.2, pp. 1019-1022.

Hubbell Power Systems. (2014). Technical Design Manual. 3rd ed. Hubbell Power Systems, Inc., Centralia, MO.

ICC-Evaluation Services. (2007). AC308 Acceptance Criteria for Helical Pile Foundations and Devices.

Jesus, A. P. (2002). Caracterização Geológica, Geomorfológica e Geotécnica de um Corpo de Dunas na Cidade de Natal/RN. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 214p.

Lima Filho, F. P. (2017). Relatório da aquisição, processamento e análise de dados GPR. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Laboratório de Análise Estratigráficas. 25p.

Livneh, B. e El Naggar, M. (2008). Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading. Canadian Geotechnical Journal, 45(8), pp.1142-1155.

Lutenegger, A. J. (2011). Behavior of Multi-Helix Screw Anchors in Sand. Proceedings of 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Canada.

Lutenegger, A. J., Erikson, J., e Williams, N. (2014). Evaluating Installation Disturbance of Helical Anchors in Clay from Field Vane Tests. Deep Foundations Institute.

Mitsch, M.P. e Clemence, S.P. (1985). The uplift capacity of helix anchors in sand. Proceedings of Uplift behavior of anchor foundations in soil, ASCE, Detroit, pp. 26-47.

Perko, H. (2009). Helical piles: a practical guide to design and installation. J. W. Sons, Ed.

Perko, H. A. e Rupiper, S. J. (2000). Helix pier engineering: handbook 2000. Ingal Precision Foundations, Inc. Worldwide Helix Pier Distributors.

Prasad, Y.V.S.N. e Narasimha Rao, S. (1996). Lateral Capacity of Helical Piles in Clays. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No.11, pp. 938-941.

Sakr, M. (2009). Performance of Helical Piles in Oil Sand. Canadian Geotechnical Journal, vol. 46 (9), pp. 1046-1061.

Santos Filho, J.M.S.M. (2014) Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 117 f.

Schiavon, J. A. (2016). Comportamento de ancoragens helicoidais submetidas a carregamentos cíclicos. PhD thesis, University of São Paulo and Nantes Angers and Le Mans University, São Carlos.

Science Museum Group Collection. (2018). Disponível em <https://collection.sciencemuseum.org.uk/objects/co55426/model-of-the-lighthouse-on-the-maplin-sands-model-representation-lighthouse>. Acessado em 18/01/2018.

Stephenson, R.W. (2003). Design and Installation of Torque Anchors for Tiebacks and Foundations. Missouri University of Science and Technology, Rolla, 45p.

Tsuha, C. H. C. (2007). Modelo Teórico para Controle da Capacidade de Carga à Tração de Estacas Metálicas Helicoidais em Solo Arenoso. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 245p.

Tsuha, C. H. C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L., and Garnier, J. (2012). Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. Canadian Geotechnical Journal, 46(9), pp. 1102-1114.

Zhang, D. (1999). Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils. MSc Thesis, University of Alberta, Edmonton.