JOÃO MANOEL SAMPAIO MATHIAS DOS SANTOS FILHO

Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Profª. Dr. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Versão corrigida
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S237e

Santos Filho, João Manoel Sampaio Mathias dos
Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical / João Manoel Sampaio Mathias dos Santos Filho; orientadora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Estaca helicoidal. 2. Fundações profundas. 3. Capacidade de carga à tração. 4. Solos tropicais. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOÃO MANOEL SAMPAIO MATHIAS DOS SANTOS FILHO**.

Título da dissertação: "Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical".

Data da defesa: 31/03/2014

Comissão Julgadora: **Resultado:**

Profa. Dra. **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha (Orientadora)** — Aprovado
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Roger Augusto Rodrigues** — aprovado
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

Prof. Dr. **Paulo José Rocha de Albuquerque** — APROVADO
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela coragem, saúde e disposição para o trabalho e enfrentamento dos desafios que a vida nos apresenta.

Agradeço a Profª. Drª Cristina Tsuha, pela sua orientação, amizade, dedicação, paciência e apoio durante todas as fases de realização deste trabalho.

Agradeço a Vercon Industrial e a Vértice Engenharia, na pessoa do Sr. Roberto Dolabella, pelo apoio financeiro, através do convênio de pesquisa entre a Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI , Construtora Vértice Ltda. e Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, fundamental para realização dos ensaios em Betim-MG.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo N° 2010/19039-6) pelo apoio financeiro que possibilitou a retirada de amostras e realização dos ensaios no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – CRHEA.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, Oscar, Zé Luis e Benedito pelo auxilio na retirada das amostras e realização de ensaios no Lab. de Mecânica dos Solos.

Agradeço ao Clever, Técnico do Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, pelas valiosas instruções sobre instrumentação e pelo empréstimo do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios de campo.

Agradeço a Loana e ao Gustavo pela amizade e apoio na realização dos ensaios no Broa.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Geotecnia, Maristela, Neiva, Álvaro, Herivelto, Toninho e Benê, sempre dispostos a ajudar no que for necessário.

Agradeço a todos os meus colegas da turma do mestrado (Camila, Isabela, Juliana, Ligia, Maria Paula e Ynaê) e especialmente ao Christopher e o Phillipe, pela amizade e companheirismo nas horas de estudo e divertimento.

Agradeço a minha família, João (pai), Claudete (mãe) e Manuela (irmã) que mesmo distante me apóiam incondicionalmente.

Agradeço a todos os meus familiares, especialmente a minha Tia Marta, minha Avó Georgina e o meu Tio-avô Ribamar (*in memoriam*) por todos os conselhos e o apoio.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Geotecnia pela sua contribuição imprescindível na minha formação de geotécnico.

Agradeço a minha namorada Thaise pelo amor, compreensão e apoio em todas as etapas da realização de mais esta etapa de nossas vidas.

Agradeço a Profª. Viviane Ramos, minha orientadora da graduação na UFAL, e Prof. Colatino pelo incentivo no momento da decisão de fazer o mestrado.

Agradeço aos meus amigos da UFAL, que vieram para São Carlos junto comigo (Nichollas, Marcell, Ricardo, Ketson, Emerson, Gregório e Cleilson), aos que vieram em épocas passadas (Diego, Guilherme, Irene, David, Thiago) e aos amigos que fiz aqui (especialmente a nossa vizinha de casa e departamento, a Laurenn) pelos momentos de descontração indispensáveis para organização das ideias.

Agradeço aos colegas do Departamento de Geotecnia pela boa convivência e discussões na hora do café (Ana, Breno, Bruno, Jussara, Mariana, Murilo, Nêne, Nestor, Rafaela), que muito contribuíram para minha formação e resolução de problemas relacionados ao trabalho, como também nos momentos felizes das confraternizações do departamento.

RESUMO

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

Neste trabalho é avaliado o comportamento de estacas helicoidais instaladas em solo residual tropical, submetidas a esforços de tração. Para este fim, foram ensaiadas estacas helicoidais em dois campos experimentais distintos, um em Itirapina (SP), e outro em Betim (MG). No primeiro terreno, as hélices das estacas ficaram instaladas em solo residual não saturado, e no segundo terreno em solo residual saturado. Neste tipo de fundação, o efeito da instalação da estaca no solo acima das hélices é um dos fatores que afetam significantemente a capacidade de carga à tração da estaca. Portanto, considerando-se a modificação que ocorre na estrutura de solos residuais tropicais após serem penetrados pelas hélices da estaca durante a sua instalação no terreno, a presente pesquisa foi desenvolvida com o intuito de compreender o efeito desta desestruturação do solo no comportamento da estaca à tração. Para esta avaliação, foi realizado um programa experimental com provas de carga em estacas helicoidais (instrumentadas e não-instrumentadas) e ensaios de laboratório em amostras indeformadas do solo coletado ao redor de uma estaca instalada no terreno de Itirapina. Os resultados mostram o efeito significante da instalação na capacidade de carga à tração deste tipo de estaca, principalmente no caso de solo poroso e não saturado. Além disso, por meio dos ensaios em estacas instrumentadas, foi verificado que este efeito é mais acentuado no solo acima das hélices superiores, que foi penetrado mais vezes durante a instalação.

Palavras-chave: Estaca helicoidal. Fundações profundas. Capacidade de carga à tração. Solos tropicais.

ABSTRACT

SANTOS FILHO, J.M.S.M. **Effects of installation of helical piles in tropical soils**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

In this work, it was evaluated the behavior of helical piles installed in tropical residual soil under tensile loads. For this purpose, helical piles of different configuration were tested in two different experimental sites, one in Itirapina (SP), and another in Betim (MG). In Itirapina, the pile helices were installed in unsaturated residual soil, and in Betim in saturated residual soil. For this type of foundation, the effect of pile installation on the soil above the helices is one of the factors that significantly affect the pile uplift capacity. Therefore, considering the changes that occur in the structure of tropical residual soils after being penetrated by the helices during pile installation, this research was conducted in order to understand the effect of this soil alteration on the uplift behavior of helical piles installed in this type of soil. For this evaluation, pile load tests were carried out on instrumented and non-instrumented helical piles. Also, laboratory tests were performed on undisturbed soil samples collected around a pile installed in the site of Itirapina. The results show the significant effect of pile installation on the uplift capacity of the tested helical piles, especially in the case of porous and unsaturated soil. In addition, through the tests on the instrumented piles, it has been found that this effect is more pronounced in the soil above the upper helices, which were penetrated more times during pile installation.

Keywords: Helical piles. Deep foundations. Uplift capacity. Tropical soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Vista geral do farol de Maplin Sands (PERKO, 2009).....24

Figura 2.2: (a) Hélices recém conformadas, (b) Soldagem de uma hélice a haste central de uma estaca (CARVALHO, 2007). 25

Figura 2.3: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal.....25

Figura 2.4: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas (CARVALHO, 2007).....26

Figura 2.5: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010). 28

Figura 2.6: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo não-coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010). 29

Figura 2.7: Equipamento de instalação de estacas helicoidais (VERCON IND., 2013). 30

Figura 2.8: (a) Troquímetro para acompanhamento da instalação, (b) detalhe do torquímetro (TSUHA, 2007).....31

Figura 2.9: Regiões de ocorrência de solos lateríticos no Brasil (MELFI, 1994). 32

Figura 2.10: Diagrama de corpo livre de uma estaca helicoidal submetida a um esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método do cilindro de cisalhamento (Adaptado de PERKO, 2009). 34

Figura 2.11: Instalação de estaca com fuste de seção quadrada representando o espaço vazio entre a barra e o solo devido à rotação. (Adaptado de YOUNG, 2012).....36

Figura 2.12: Diagrama de corpo livre de uma estaca helicoidal submetida a um esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método das capacidades individuais (Adaptado de PERKO, 2009). 37

Figura 2.13: Mecanismo de penetração de uma hélice (Adaptado de KANAI, 2007).....40

Figura 2.14: Estacas com diferentes espaçamentos entre hélices que condicionam a forma de ruptura de acordo com os métodos (a) capacidades individuais e (b) cilindro de cisalhamento (Adaptado de VYAZMENSKY, 2005). 41

Figura 2.15: Forças mobilizadas por uma estaca helicoidal submetida a tração e a compressão. 44

Figura 3.1: Seções guia das estacas ensaiadas no Campo Experimental do Broa – Medidas em milímetros (Adaptado de Santos, 2013). 48

Figura 3.2: Perfil geotécnico provável da Área 1 (Medidas em metros). 48

Figura 3.3: Locação das estacas na Área 1 (Medidas em metros). 49

Figura 3.4: Sistema de reação e arranjo geral das provas de carga realizadas no Broa..... 50

Figura 3.5: Amostra indeformada e caixa de amostragem/transporte. 51

Figura 3.6: Detalhe do poço de investigação e local de retirada das amostras indeformadas – Medidas em milímetros. 52

Figura 3.7: Indicação do bloco em relação a estaca C3 na ocasião da coleta. 53

Figura 3.8: (a) Corte do prisma a partir do bloco parafinado; (b) paralelização e planificação das faces; (c) prisma colocado no torno e moldagem para desbaste das laterais; (d) corpo de prova pronto. 54

Figura 3.9: Localização dos furos de sondagem e das estacas ensaiadas. 56

Figura 3.10: Seção guia instrumentada – Posição da instrumentação e dimensões (Medidas em milímetros). 57

Figura 3.11: Disposição dos extensômetros e ligações dos circuitos de medição. 58

Figura 3.12: Topo da seção guia: (a) cabos de ligação e (b) cabos de condução, após emenda. 58

Figura 3.13: Etapas de preparação da superfície: (a) lixamento e (b) limpeza com álcool. 59

Figura 3.14: (a) Procedimento de colagem, (b) extensômetro colado e fios de ligação. 59

Figura 3.15: (a) Luvas para proteção mecânica, (b) parte da seção guia com as seções S1 e S2. 60

Figura 3.16: Detalhe da ligação para calibração.....60

Figura 3.17: Esquema da montagem para calibração da instrumentação: Tração.....61

Figura 3.18: Calibração da instrumentação para esforço de tração (a) vista geral do pórtico com a estaca e (b) detalhe da célula de carga e macaco vazado.....61

Figura 3.19: Calibração – Seção S1: Força. 62

Figura 3.20: Calibração – Seção S2: Força. 62

Figura 3.21: Esquema da montagem para calibração da instrumentação: Torque. 63

Figura 3.22: Calibração da instrumentação para medição de torque (a) estaca instrumentada (b) vista geral da montagem.....63

Figura 3.23: Calibração – Seção S1: Torque. 64

Figura 3.24: Calibração – Seção S2: Torque. 64

Figura 3.25: Condução dos cabos da instrumentação (a) vista geral (b) detalhe dos cabos no furo. 65

Figura 3.26: Perfil SP-01 e indicação da posição da estaca teste (IN1) e seções instrumentadas no perfil. 66

Figura 3.27: Perfil SP-02 e indicação da posição da estaca teste (IN2) e seções instrumentadas no perfil. 67

Figura 3.28: Montagem típica das provas de carga. 68

Figura 3.29: Seção guia da estaca com guia e extensões de mesmo diâmetro: Ensaio NIN (Medidas em milímetros). 69

Figura 3.30: Seção guia perfurada para injeção do material de preenchimento. 70

Figura 3.31: Equipamentos utilizados na produção e injeção do material de preenchimento. 71

Figura 4.1: Vazio sob a hélice observado após ensaio de tração. 74

Figura 4.2: Curva carga *versus* deslocamento obtida nas prova de carga à tração e compressão realizadas na estaca A1 (estaca com uma hélice). 75

Figura 4.3: Curva carga *versus* deslocamento obtida nas provas de carga à tração e compressão realizadas na estaca A2 (estaca com duas hélices). 76

Figura 4.4: Curvas torque de instalação *versus* profundidade da ponta da estaca para as instalações IN1 e IN2. 78

Figura 4.5: Curvas carga total de tração *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga instrumentadas IN1 e IN2. 79

Figura 4.6: Curvas torque *versus* profundidade da ponta estaca obtidas pela instrumentação. Ensaio IN1. 81

Figura 4.7: Curvas torque *versus* profundidade da ponta estaca obtidas pela instrumentação. Ensaio IN2. 82

Figura 4.8: Diagrama de transferência de carga para a instalação em SP-01. 83

Figura 4.9: Diagrama de transferência de carga para a instalação em SP-02. 84

Figura 4.10: Diagrama de atrito lateral nos ensaios IN1 e IN2. 86

Figura 4.11: Torque de instalação das estacas com guia e extensões de 101,6 mm (NIN) e da estaca com guia reduzida, de 73,0 mm (IN1). 89

Figura 4.12: Curvas carga versus deslocamento obtidas nas provas de carga a tração realizadas nas estacas com guia e extensões de mesmo diâmetro (NIN) e guia reduzida (IN1). 90

Figura 4.13: Indicação da zona perturbada pela passagem dos parafusos da conexão para calibração.....92

Figura 4.14: Estaca após injeção e endurecimento da nata de cimento. 93

Figura 4.15: Curva granulométrica. 95

Figura 4.16: Curvas tensão desviatória *versus* deformação e poro-pressão *versus* deformação do solo não perturbado (intacto). 97

Figura 4.17: Curvas tensão desviatória *versus* deformação e poro-pressão *versus* deformação do solo perturbado. 97

Figura 4.18: Curvas Parâmetro *A versus* deformação. 98

Figura 4.19: Envoltória de ruptura (tensões efetivas) do solo não perturbado. 99

Figura 4.20: Envoltória de ruptura (tensões efetivas) do solo perturbado. 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores de K_u (MITSCH e CLEMENCE, 1985) 39

Tabela 2.2: Valores de $(H_1/D_1)_{cr}$ em função do ângulo de atrito (DAS, 1990)..... 43

Tabela 2.3: Comparação entre valores de P_{UC}/P_{UT} encontrados na literatura..... 46

Tabela 4.1: Resultado das provas de carga a tração (Adaptado de Santos, 2013) 73

Tabela 4.2: Capacidade de carga devido a hélice (tração e compressão) – Estaca A1 76

Tabela 4.3: Comparação entre valores de P_{UC}/P_{UT} encontrados na literatura..... 77

Tabela 4.4: Torques finais de instalação (em kN.m), total e parcelas obtidas pela instrumentação. 82

Tabela 4.5: Cargas últimas convencionadas da estaca (em kN) e parcelas obtidas pela instrumentação. 85

Tabela 4.6: Geometria e tensão de atrito obtidas nos testes IN1 e IN2. 86

Tabela 4.7: Fatores de torque (K_t), em m^{-1}..... 87

Tabela 4.8: Resumo dos resultados dos ensaios IN1 e NIN. 90

Tabela 4.9: Propriedades físicas do solo. 96

Tabela 4.10: Parâmetros de resistência efetivos (pico). 100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 19

1.1. OBJETIVOS 22

1.1.1. Objetivo geral 22

1.1.2. Objetivos específicos 22

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23

2.1. ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS 23

2.1.1. Breve Histórico 23

2.1.2. Características Básicas 24

2.1.3. Vantagens 27

2.1.4. Instalação 29

2.2. SOLOS TROPICAIS 31

2.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS 33

2.3.1. Método do cilindro de cisalhamento 33

2.3.1. Método de capacidades individuais 36

2.4. INFLUÊNCIA DA INSTALAÇÃO E GEOMETRIA 39

2.4.1. Influência do espaçamento entre hélices na forma de ruptura 41

2.4.2. Influência da profundidade na forma de ruptura 42

2.5. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA INSTALAÇÃO ATRAVÉS DE COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO 43

3. MATERIAIS E MÉTODOS 47

3.1. ENSAIOS ÁREA 1 47

3.1.1. Provas de carga 48

3.1.2. Amostragem e ensaios de laboratório 50

3.2. ENSAIOS ÁREA 2 55

3.2.1. Provas de carga instrumentada 56

3.2.1.1. Instrumentação 57

3.2.1.2. Calibração da instrumentação 60

3.2.1.3. Instalação 65

3.2.2. Caracterização geológico-geotécnica da Área 2 65

3.2.3. Montagem das provas de carga 68

3.2.4. Estaca com guia e extensões de igual diâmetro e com guia de diâmetro reduzido. 69

3.2.5. Injeção de material de preenchimento para observação de solo perturbado pela instalação 69

4. RESULTADOS E ANÁLISES 73

4.1. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 1 73

4.2. PROVAS DE CARGA INSTRUMENTADAS REALIZADAS NA ÁREA 2 78

4.2.1. Medida do torque de instalação em profundidade 80

4.2.2. Diagramas de transferência de carga 83

4.2.2.1. Desenvolvimento do atrito lateral 85

4.2.3. Valores do fator de torque (K_t) das estacas instrumentadas 87

4.2.4. Estaca com guia e extensões de igual diâmetro e com guia de diâmetro reduzido . 89

4.2.5. Verificação do efeito de instalação através de injeção de nata de cimento 93

4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NO SOLO DA ÁREA 1 94

4.3.1. Ensaios de caracterização 94

4.3.2. Ensaios de compressão triaxial 96

4.3.2.1. Curvas tensão *versus* deformação 96

4.3.2.2. Parâmetro *A* de Skempton 98

4.3.2.3. Parâmetros de resistência 98

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 101

5.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 102

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA 113

APÊNDICE B – LUVAS DE PROTEÇÃO 115

ANEXO A – VALORES DE N_q , N_c e C_a 117

1. INTRODUÇÃO

A estaca helicoidal é um tipo de elemento estrutural de fundação constituído por uma haste central, onde são soldadas uma ou mais placas helicoidais (PRASAD e NARASIMHA RAO, 1996). A haste central pode apresentar a seção transversal circular ou quadrada (maciça ou vazada). As hélices são soldadas a partir da ponta da haste em ordem crescente de diâmetros (cônicas) ou com diâmetros iguais (cilíndricas). O diâmetro das hélices pode variar de duas a quatro vezes o diâmetro da haste (KURIAN e SHAH, 2009).

O número de placas helicoidais (ou hélices) de uma estaca depende das condições do solo e da capacidade de carga requerida. O tubo central é utilizado para transferir o torque durante a instalação e o esforço nas hélices quando a estaca é carregada. No Brasil, são produzidas estacas de até seis hélices.

A instalação destas estacas no solo é feita pela aplicação de um torque no topo da haste, por meio mecânico. Para isto, deve ser utilizado um equipamento dotado de sistema hidráulico compatível com o motor hidráulico e o torque requerido. Durante a instalação, o torque aplicado é registrado em um torquímetro acoplado à composição.

De acordo com diversos pesquisadores (HOYT e CLEMENCE, 1989; NARASIMHA RAO et al., 1989; GHALY et al., 1991; GHALY e HANNA, 1991; PERKO, 2000; TSUHA, 2007; TSUHA e AOKI, 2010), a capacidade de carga da fundação em estaca helicoidal pode ser correlacionada ao torque medido no final da instalação por meio de uma relação linear. Este valor de torque é uma medida indireta da resistência do solo que é atravessado pelas hélices. Deste modo, quando se atinge o valor de torque definido em projeto, a penetração da estaca no terreno é paralisada. Este procedimento de controle de execução de estacas helicoidais é equivalente ao controle dos registros de nega em estacas cravadas.

No entanto, a verificação do torque definido em projeto é um método de controle e não de previsão da capacidade de carga da estaca. Segundo Hoyt e Clemence (1989), os principais métodos utilizados para previsão da capacidade de carga a tração de ancoragens helicoidais são: método do cilindro de cisalhamento e método das capacidades individuais. Perko e

Rupiper (2000) afirmam que quando o espaçamento entre as hélices é de aproximadamente três diâmetros, os resultados dos dois métodos se aproximam. As estacas helicoidais usadas no Brasil são fabricadas com o espaçamento entre as hélices igual a três diâmetros da hélice inferior.

Pelo método das capacidades individuais, as hélices de uma estaca são equivalentes a um conjunto de sapatas solicitadas à tração, de modo que a superfície de ruptura mobilizada acima de cada hélice não atinge a hélice superior. Deste modo, a capacidade de carga a tração de estacas helicoidais aumenta com o número de hélices. Neste método a capacidade de cada hélice é estimada com base na equação da capacidade de carga de Terzaghi (1943).

No entanto, tem sido observado em ensaios em campo que em determinadas situações, o aumento na capacidade de carga à tração com o aumento do número de hélices não ocorre como esperado. Este fato pode ser observado nos estudos de Clemence et. al. (1994), Sakr (2009), Lutenneger (2011) e Tsuha et al. (2012). Kanai (2007) instrumentou estacas helicoidais e mostrou que a maior parte da capacidade de carga das estacas multi-hélices é resistida pela hélice da ponta.

Este fato ocorre porque o solo acima das hélices superiores foi cortado, deslocado e alterado mais vezes do que o solo acima da hélice da ponta. E como a capacidade de carga à tração da estaca helicoidal depende das condições do solo acima das hélices, que é solicitado quando a estaca é carregada, e este solo acima das hélices superiores perde grande parte das suas características iniciais por ter sido atravessado mais de uma vez, sua contribuição na capacidade de carga da estaca é mínima.

O fato de o solo ser atravessado pela hélice da estaca uma única vez pode ser suficiente para que grande parte de sua resistência inicial seja perdida. Este comportamento foi observado em solos tropicais porosos, estruturados e não saturados no Brasil (TSUHA, 2013). Na tentativa de quantificar a perda de resistência do solo devido a instalação de estacas helicoidais, Santos et al. (2012) realizaram ensaios de cone ao lado de estacas helicoidais instaladas em solo tropical residual. Eles verificaram que, no caso apresentado, há uma redução do atrito lateral medido pelo cone.

Solos tropicais são bastante comuns em nosso país. A instalação de estacas helicoidais nestes solos provoca grandes alterações em sua resistência ao cisalhamento. Estes solos quando intactos, por serem estruturados, apresentam grande estabilidade (ALMEIDA et al., 2011). Mas, a perturbação causada pela instalação diminui consideravelmente sua resistência e, consequentemente, a capacidade de carga das estacas.

No caso de solos residuais no Brasil, o comportamento é variável. Quando o solo residual tropical de instalação é poroso (N_{SPT} inferior a 8 golpes/30cm) a perda da capacidade de carga do solo após a penetração da hélice é significante. No entanto, quando as hélices da estaca helicoidal são instaladas em solos residuais com valores de N_{SPT} superiores, da ordem de 18 golpes/30cm, a perda devido ao efeito de instalação no solo não é significante. Porém, em alguns casos, devido a problemas de camadas muito espessas ou da presença de matacões, estas estacas ficam instaladas em solo tropical poroso, e neste caso a capacidade de carga à tração da estaca é prejudicada.

Portanto, considerando-se que o uso destas estacas aumentou significantemente no Brasil nos últimos cinco anos, juntamente com o aumento de obras de linhas de transmissão de energia, esta pesquisa foi desenvolvida para auxiliar na compreensão do comportamento deste tipo de estaca em solos tropicais quando carregada a tração ou compressão.

Como o efeito da instalação das hélices no solo solicitado quando a estaca é carregada influencia consideravelmente o seu comportamento, este trabalho é focado no entendimento e quantificação do efeito de instalação em estacas helicoidais embutidas em solos tropicais. Pretende-se com os resultados deste trabalho auxiliar e melhorar o dimensionamento de estacas helicoidais em solos tropicais.

Neste estudo, foram utilizadas diferentes técnicas para verificar o efeito da instalação no solo e na capacidade de carga à tração da estaca. Estes procedimentos diversos foram realizados em dois locais distintos, uma parte dos ensaios foi realizada em um terreno em Betim/MG, e outra parte no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), em Itirapina/SP.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é estudar a influência do procedimento de instalação na capacidade de carga à tração de estacas helicoidais em solos tropicais, e avaliar a perturbação causada no solo durante o processo de instalação.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Avaliar por meio da comparação de provas de carga de tração em estaca com uma hélice (em solo perturbado) e compressão (em solo natural) a redução da tensão de ruptura devido ao efeito da instalação da estaca em solo tropical;
- Avaliar a possibilidade de instalação de seção guia com tubo de diâmetro reduzido em relação às extensões, para reduzir o efeito da instalação causado na parcela de resistência por atrito lateral da capacidade de carga à tração da estaca;
- Por meio de ensaios de laboratório, avaliar a degradação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo após a instalação da estaca;
- Verificar por meio de injeção de material de preenchimento a disposição das regiões de solo mais perturbado ou ocorrência de vazios provocados pela instalação da estaca;
- Verificar a distribuição de torque desenvolvido ao longo da estaca durante a instalação, por meio de instrumentação em profundidade para o registro de torque;
- Verificar a distribuição de esforço normal desenvolvido ao longo da estaca durante a prova de carga, por meio de instrumentação em profundidade, para o registro de medidas de força.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS

2.1.1. Breve Histórico

No primeiro relato sobre o uso de estacas helicoidais é mencionado que este tipo de fundação foi inventado em 1836 pelo engenheiro civil Alexander Mitchell. O primeiro foi em 1838, quando Mitchell utilizou as estacas helicoidais na fundação do Farol de Maplin Sands (Figura 2.1), construído no Rio Tamisa, na Inglaterra. As hastes das primeiras estacas eram confeccionadas de ferro ou madeira, e as hélices eram somente de ferro (PERKO, 2009).

As estacas helicoidais, como conhecidas nos dias atuais, são a evolução das estacas conhecidas como estaca parafuso. A publicação mais antiga sobre estaca parafuso trata de um tronco com uma hélice de ferro, que era cravado no solo pela aplicação manual de torque sobre seu eixo, de forma análoga a instalação de um parafuso na madeira. Após a instalação da estaca, ela era retirada e o furo imediatamente preenchido com concreto. Este tipo de fundação era utilizado em pequenas estruturas (CARVALHO, 2007).

Segundo Clemence (1985), na década de 1950 ocorreu um desenvolvimento significativo das estacas helicoidais. Este tipo de fundação teve seu uso inicialmente na indústria da energia elétrica e telecomunicações, mas devido as suas vantagens (rápida instalação, capacidade de carregamento imediato e resistência a tração e compressão), nos últimos vinte anos passaram a ser utilizadas também em aplicações distintas como: ancoragem de estruturas sujeitas a elevação, fundações de novas construções residências, e contenções de terra (MERIFIELD, 2011). No entanto, o uso desta estaca tem sido de certa forma limitado devido à falta de conhecimento do seu comportamento, sendo o dimensionamento baseados em regras empíricas e recomendações de fabricantes (TSUHA, 2007).

A utilização de fundações em estacas helicoidais teve inicio no Brasil no final do século XX. Sua utilização, a principio, se deu em linhas de transmissão de energia e de telecomunicações, para resistir a esforços de tração. No entanto, sabe-se que no exterior este tipo de função é empregado a mais de 60 anos (TSUHA, 2007).

Figura 2.1: Vista geral do farol de Maplin Sands (PERKO, 2009).

2.1.2. Características Básicas

De acordo com Mitsch e Clemence (1985), estacas helicoidais são compostas por uma série de hélices de forma circular, soldadas a um tubo central (fuste), com determinado espaçamento entre elas. O número e diâmetro das hélices são calculados de acordo com as características do solo para proporcionar uma capacidade de carga desejada (TSUHA, 2007).

A Figura 2.2 apresenta uma série de hélices recém conformadas e o processo de soldagem da hélice da ponta na haste central de uma estaca.

(a) (b)

Figura 2.2: (a) Hélices recém conformadas, (b) Soldagem de uma hélice a haste central de uma estaca (CARVALHO, 2007).

Os componentes básicos de uma estaca helicoidal são: seção guia e extensões. A seção guia é a primeira seção instalada, é nela onde estão fixadas as hélices. As extensões são tubos lisos com sistema de acoplamento tipo ponta e bolsa, com parafusos que são acrescentados a seção guia para que ela alcance o solo com resistência requerida em projeto (PERKO, 2009).

A Figura 2.3 apresenta uma ligação entre seções de uma estaca. As estacas fabricadas atualmente são constituídas por placas circulares de aço em forma de hélices soldadas a um tubo central de aço (CARVALHO, 2007).

Figura 2.3: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal.

A Figura 2.4 apresenta uma seção guia com as denominações de suas características básicas. O tubo pode ter seção circular vazada (tubular) ou quadrada maciça, e, por questões de facilidade de manuseio e transporte, são fabricados em comprimentos de 1 a 3 m. As hélices são fabricadas com passo controlado e constante para uma mesma estaca, de forma a causar a menor perturbação possível no solo quando da sua instalação (CARVALHO, 2007).

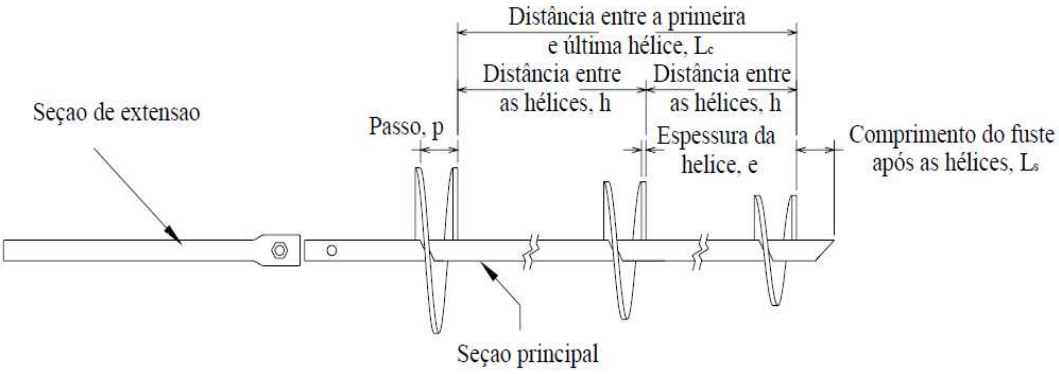


Figura 2.4: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas (CARVALHO, 2007)

As estacas helicoidais podem ser fabricadas com uma ou mais hélices. Quando a estaca possui apenas uma hélice, é denominada simples. Porém, quando possui duas, ou mais, é denominada multi-hélice (KULHAWY, 1985). A configuração das estacas multi-hélice pode ser de mesmo diâmetro (cilíndrica) ou com diâmetros crescentes (cônica), no sentido da ponta para o topo. Este último modelo é o mais utilizado nas obras.

Como no Brasil ainda não há norma especifica que trata da fabricação de estacas helicoidais, não existe padronização no número, espessura, passo e diâmetro, ficando desta forma cada fabricante responsável por estas definições. Sabe-se, no entanto, que estas espessuras e diâmetros devem ser compatíveis com os esforços introduzidos durante o processo de instalação e quando submetidos ao carregamento de serviço, levando-se em conta a sua diminuição devido à corrosão.

Porém, quanto ao espaçamento entre as hélices das estacas usadas no Brasil, utiliza-se geralmente a distância equivalente a três diâmetros da hélice inferior.

A respeito da corrosão, Perko e Rupiper (2000) afirmam que as estacas metálicas helicoidais devem ser protegidas deste processo por meio de galvanização ou outros métodos

apropriados. Desta forma, as estacas helicoidais são fabricadas em aço carbono galvanizado ou tipo patinável. Este último sendo bem mais resistente a corrosão que o aço carbono comum. Sua principal característica é o desenvolvimento, quando exposto aos agentes corrosivos, de uma película protetora de óxido aderente à superfície que tende a se estabilizar com o tempo. Esta película proporciona boa resistência à ação da água e do oxigênio do ar, que por sua vez, reduz a velocidade da corrosão. (SILVA e VILLEGAS, 2008).

2.1.3. Vantagens

De acordo com Perko (2009) as principais vantagens das estacas helicoidais sobre outros tipos de fundação são as seguintes:

- Resistente a erosão e fluxo para aplicações em pontes;
- Podem ser removidas em aplicações temporárias;
- São facilmente transportadas para locais remotos;
- O torque de instalação pode ser uma verificação da capacidade de carga;
- Instalação em terrenos de nível d'água superficial sem necessidade de rebaixamento;
- Geralmente requerem pouco tempo para instalação;
- Podem ser instaladas inclinadas para aumento da resistência a esforços horizontais;
- Podem ser instaladas com pequenos equipamentos em locais com restrições;
- São instaladas com baixo ruído e mínima vibração;
- Podem ser grauteadas no local durante a instalação;
- Podem ser galvanizadas para resistir à corrosão;
- Elimina cura de concreto e trabalhos com formas;
- Não produz bota-fora;
- Minimiza perturbações em locais ambientalmente sensíveis.

Além das vantagens descritas acima, as estacas metálicas helicoidais atualmente apresentam-se como a principal solução de fundação profunda adotada para torres de linhas de transmissão tanto auto-portantes como estaiadas. Isto se deve a capacidade destas estacas resistirem a esforços tanto de tração como de compressão e o reduzido contingente para instalação e transporte (VÉRTICE ENG., 2004).

Para Carvalho (2007), como em todo o tipo de fundações, também há restrições quanto ao emprego de estacas metálicas helicoidais. Ele explica que solos com características que possam danificar as estacas ou mesmo que causem impedimento da instalação a uma profundidade adequada para resistir a esforços de tração são restritivos. Isto inclui os solos com grande quantidade de pedregulhos e matacões.

A depender do tipo de solo e da geometria, um valor limite de N_{SPT} limite para instalação da estaca pode ser obtido através de gráficos de dimensionamento elaborados por fabricantes. Estes gráficos são construídos a partir dos modelos produzidos e experiência dos fornecedores. São levados em conta a quantidade e diâmetro das hélices das estacas, fator de torque e correlações entre o N_{SPT} e a capacidade de carga individual das hélices. Na Figura 2.5 são apresentadas curvas de capacidade de carga de algumas geometrias de estacas instaladas em solos coesivos. Na Figura 2.6 são apresentadas curvas para solos não-coesivos.

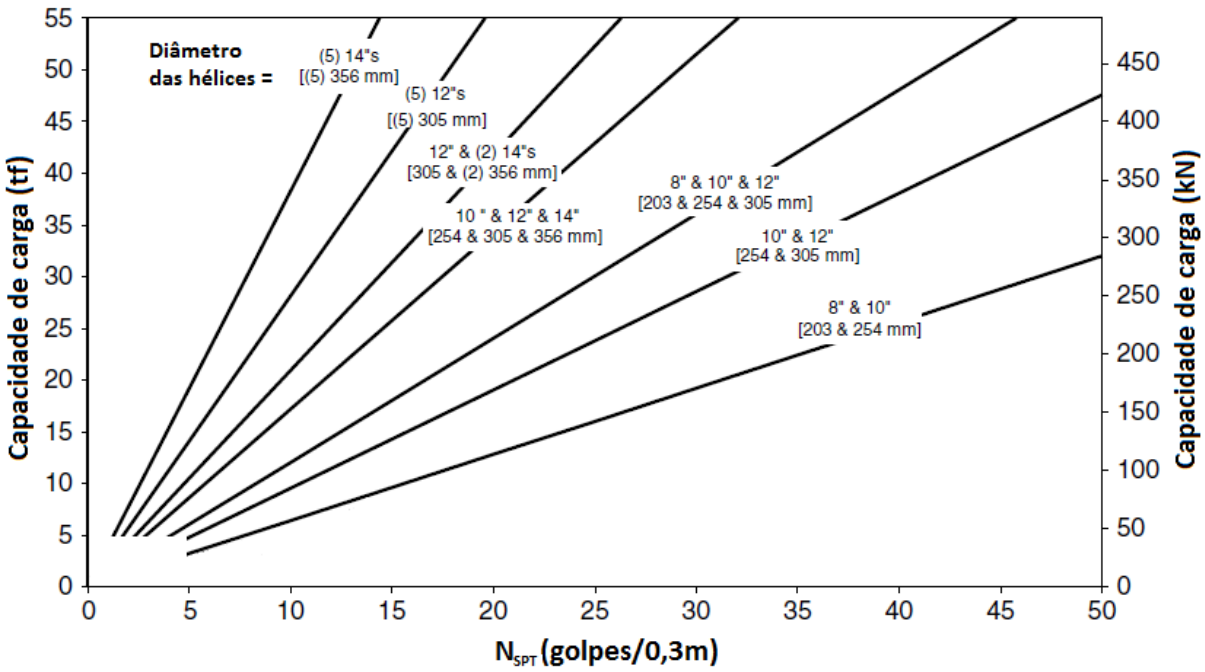


Figura 2.5: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).

Como não é levada em conta a resistência estrutural das hastes (a esforços axiais e de torção), fazem-se ainda necessárias verificações adicionais na utilização destes gráficos. Nada é comentado sobre carregamentos laterais.

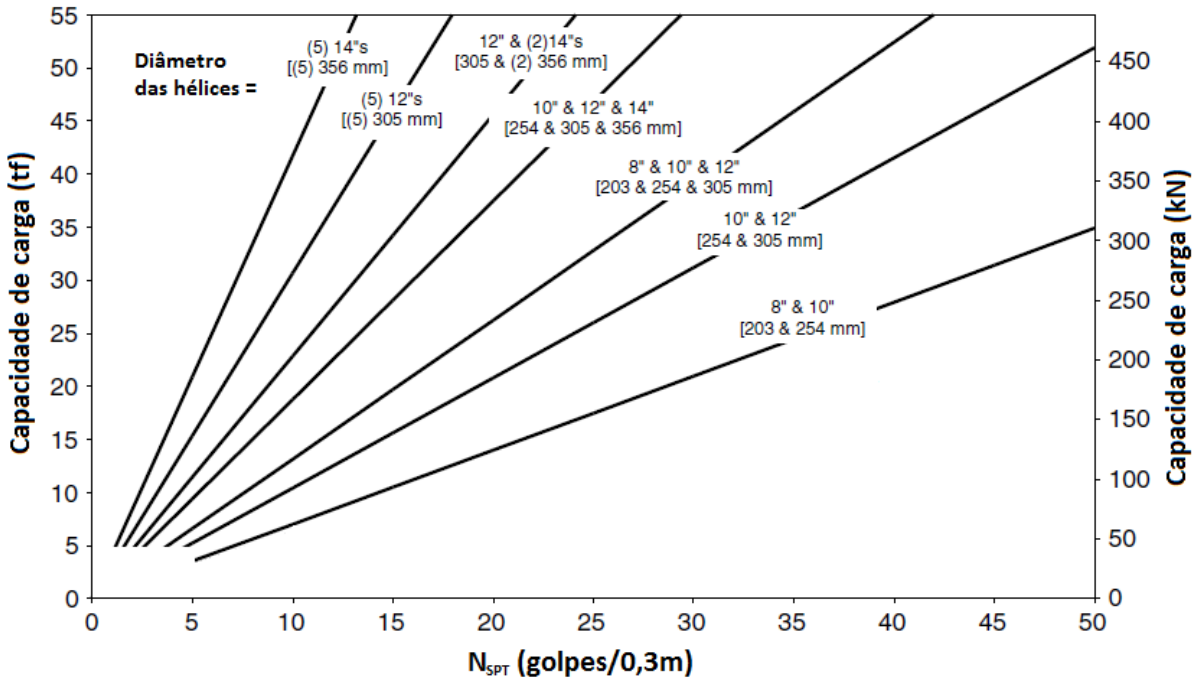


Figura 2.6: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo não-coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).

Perko (2009) também comenta que a flambagem é um limitador da carga axial que as estacas metálicas helicoidais podem suportar quando atravessam espessas camadas de solos moles ou pouco compactos. Stephenson (2003) também comenta que estacas helicoidais padrão não são eficazes quando aplicadas em estruturas que solicitem as fundações com elevados carregamentos horizontais e/ou momentos fletores. O grauteamento do fuste da estaca pode torná-la capaz de resistir a estes esforços e eliminar a possibilidade de flambagem. O lançamento de grupos de estacas adequadamente arranjadas também pode ser uma solução tecnicamente viável.

2.1.4. Instalação

Estacas metálicas helicoidais são instaladas no solo pela aplicação de um torque no topo do fuste por meio mecânico (TSUHA, 2007). Usualmente, na instalação das estacas são utilizados equipamentos dotados de sistemas hidráulicos como retro-escavadeiras, escavadeiras hidráulicas ou caminhões implementados com munck, onde é acoplado um motor de torque hidráulico. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de equipamento de instalação de estacas.

A instalação tem inicio com a conexão da seção guia ao motor de torque hidráulico utilizando um cabeçote de acoplamento e pinos de ligação. A estaca é posicionada no local e alinhada com a inclinação definida. Em seguida é aplicada uma força para penetração da ponta da estaca no solo e, após a conferência da inclinação ou verticalidade da estaca, a rotação é iniciada. Todas as seções devem ser introduzidas no solo de maneira suave e continua, a uma velocidade não superior a 30 rpm (PERKO, 2009). Em sua enciclopédia de ancoragem, a A. B. Chance Co. (2010) recomenda que a velocidade de rotação seja da ordem de 5 a 20 rpm.

Figura 2.7: Equipamento de instalação de estacas helicoidais (VERCON IND., 2013).

Durante a rotação da estaca uma pequena força axial constante deve ser aplicada para manter o avanço da estaca no terreno igual a um passo por rotação. A intensidade desta força deve ser suficiente para que a cada giro obtenha-se uma penetração de pelo menos 80% do passo. Força insuficiente, ou tração, pode resultar em avanço muito menor que o passo e provocar efeito de tradagem, que pode afetar significativamente a capacidade de carga (PERKO, 2009).

Na medida em que a penetração avança no terreno, as extensões são adicionadas. A instalação da estaca continua até que o torque e a profundidade mínimos especificados no projeto sejam obtidos, pois, o torque é diretamente proporcional a capacidade de carga da

estaca (A.B. CHANCE CO., 2002). O torque de instalação é acompanhado através de um torquímetro acoplado a composição de cravação (Figura 2.8).

(a) (b)

Figura 2.8: (a) Troquímetro para acompanhamento da instalação, (b) detalhe do torquímetro (TSUHA, 2007).

2.2. SOLOS TROPICAIS

De acordo com Little (1969) e Vaughan (1985), os solos tropicais são o produto resultante da intemperização física e química de rochas devido às variações climáticas. Estes solos se originam de processos geológicos ou pedológicos típicos de regiões de clima quente, com regime de chuva moderado a intensa, apresentando peculiaridades de comportamento e propriedades quando comparado a solos de clima temperado (VARGAS, 1985).

Em regiões tropicais, como é o caso do Brasil, cada solo possui propriedades físicas, químicas e morfológicas específicas, mas apresentam certos atributos comuns como, por exemplo, composição mineralógica simples (quartzo, caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio), grande espessura e horizontes predominantemente amarelados e avermelhados (TOLEDO et al., 2000).

De forma geral, em um perfil de solo tropical são encontrados normalmente dois tipos de solo, o laterítico e o saprolítico. O laterítico, residual ou não, intemperizado e rico em

minerais de argila e sesquióxidos forma a camada superficial. O saprolítico, localizado na camada mais profunda, apresenta ainda arranjo estrutural herdado da rocha que lhe deu origem (RESENDE, 1999).

No Brasil, devido ao clima predominantemente tropical, os solos tropicais cobrem aproximadamente 70% do seu território nacional (MELFI, 1994; MEDINA, 1997 e TOLEDO et al., 2000). A Figura 2.9 apresenta a distribuição espacial das regiões de ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil. Estes solos também ocorrem expressivamente em outros países da América do Sul, África, Índia, Austrália e Sudeste da Ásia.

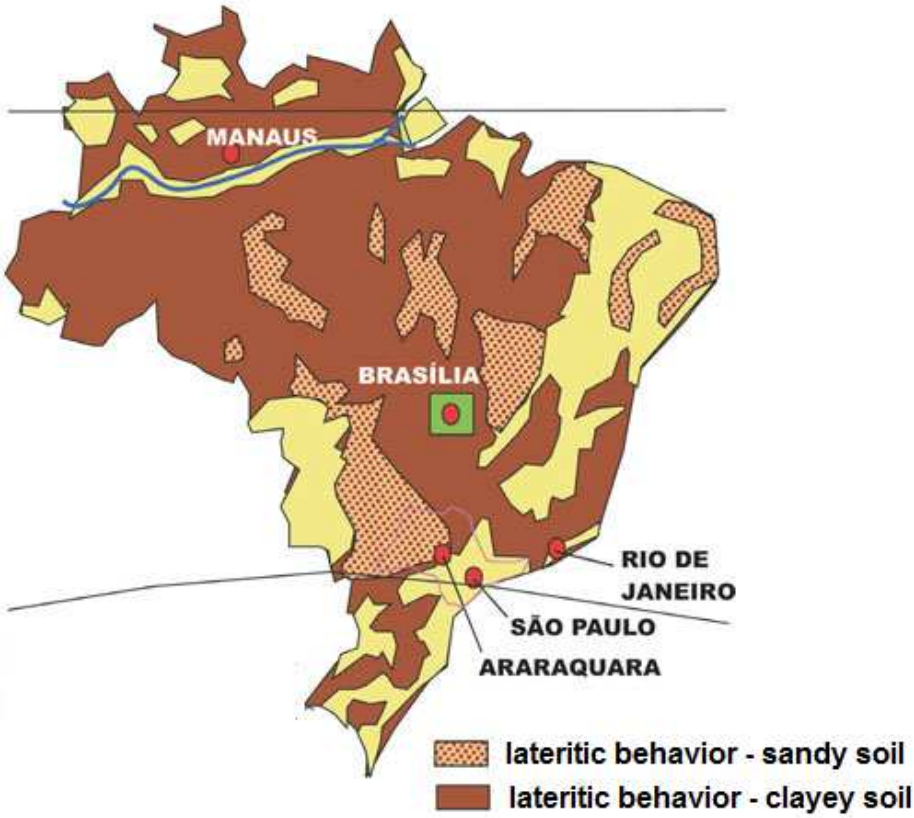


Figura 2.9: Regiões de ocorrência de solos lateríticos no Brasil (MELFI, 1994).

Segundo Nogami e Villibor (1995) solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (camada que apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais lixiviados). Nestes solos, a fração argila é constituída essencialmente por minerais cauliníticos e óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. Almeida et al. (2011) afirmam que

a cimentação causada por estes óxidos e a sucção confere a estes solos uma estrutura de poros e agregações altamente estáveis quando em condições não saturadas. Estes solos são sensivelmente mais resistentes em seu estado natural do que quando remoldados (uma sensível redução dos parâmetros de resistência ocorre no solo remoldado, principalmente na coesão (GUY e YU, 2008).

A grande porosidade de solos lateríticos justifica sua baixa massa específica e elevada porosidade e podem apresentar características de colapsibilidade (SCHULZE, 2013). O colapso é um fenômeno que ocorre em solos porosos e não saturados submetidos a uma carga após serem inundados (CINTRA e AOKI, 2009). O fato de o solo ser laterítico deve ser considerado quando cálculos são realizados, principalmente quando são utilizados métodos semi-empíricos, pois estes solos apresentam comportamento mecânico diferente de solos não lateríticos de mesma granulometria (SCHULZE, 2013). Segundo Décourt (2002), solos lateríticos apresentam propriedades de rigidez superiores às de outros solos não lateríticos de N_{SPT} semelhantes.

2.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS

2.3.1. Método do cilindro de cisalhamento

Clemence (1985) apresentou pela primeira vez o uso de um modelo de previsão de capacidade de estacas helicoidais multi-hélice com base em um mecanismo de ruptura cilíndrico. No método do cilindro de cisalhamento, assume-se que a resistência ao cisalhamento do volume cilíndrico de solo entre as hélices é mobilizada.

O diagrama de corpo livre mostrado na Figura 2.10 (a) apresenta a distribuição de forças idealizada em uma estaca helicoidal de *n* hélices carregada em compressão pelo método do cilindro de cisalhamento. Admite-se que na compressão é mobilizada a resistência do solo abaixo da hélice da ponta, e de cisalhamento na superfície formada pelo solo entre as hélices, e do atrito lateral na parcela de haste acima da hélice superior.

No caso da estaca solicitada à tração (Figura 2.10 (b)), a hélice superior é que mobiliza (apoiando-se) a resistência do solo acima dela. Neste caso, a área da hélice é computada

descontando-se a área da seção do fuste (área líquida), e os parâmetros de resistência são relativos ao solo acima da hélice superior.

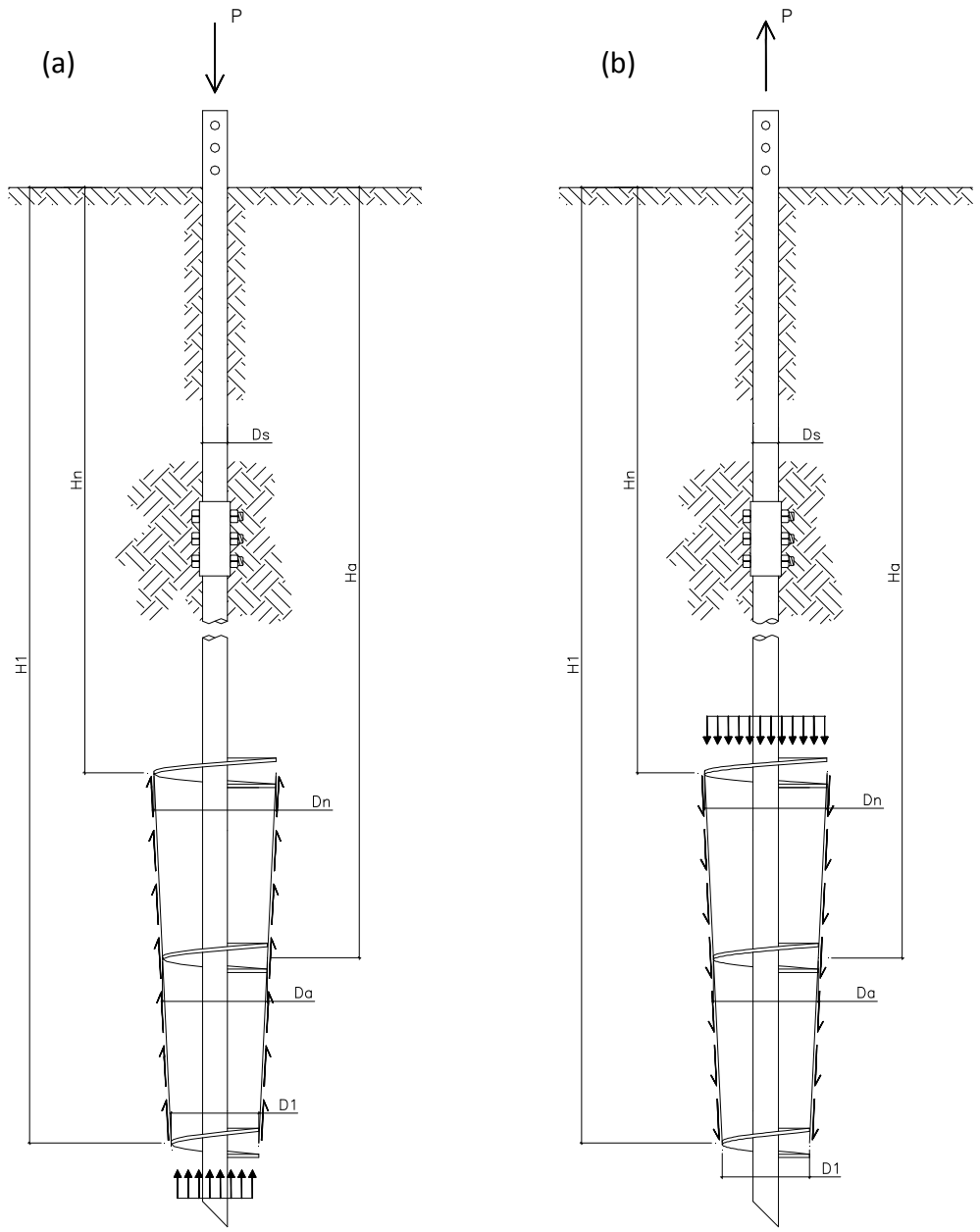


Figura 2.10: Diagrama de corpo livre de uma estaca helicoidal submetida a um esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método do cilindro de cisalhamento (Adaptado de PERKO, 2009).

A capacidade de carga à tração de estacas helicoidais pode ser calculada usando-se o método do cilindro de cisalhamento pelas Equações 1, 2 e 3. A Equação 1 é para estacas helicoidais em areia (MITSCH e CLEMENCE, 1985), e as Equações 2 e 3 são para estacas em argila e em silte (MOONEY et al., 1985):

$$P_{UT} = N_q \gamma' H_n A_n + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' \left(H_n^2 - H_1^2\right) K_u \tan\phi + p_s H_n \left(\frac{\gamma' H_n}{2}\right) K_u \tan\phi \quad (1)$$

$$P_{UT} = A_n c N_c + \pi D_a c \left(H_n - H_1\right) + p_s H_n C_a \quad (2)$$

$$P_{UT} = N_q \gamma' H_n A_n + A_n c N_c + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' \left(H_n^2 - H_1^2\right) K_u \tan\phi + p_s H_n \left(\frac{\gamma' H_n}{2}\right) K_u \tan\phi + p_s H_n C_a \quad (3)$$

onde:

K_u = coeficiente de empuxo (Tabela 2.1);

A_n = área da hélice superior;

H_1 = profundidade da hélice da ponta;

H_n = profundidade da hélice superior;

D_a = diâmetro médio das hélices;

N_q= fator de capacidade de carga à tração para areias (VER ANEXO A);

N_c = fator de capacidade de carga à tração para solo coesivo (VER ANEXO A);

p_s = perímetro do tubo da estaca;

C_a = adesão ao longo do tubo da estaca (VER ANEXO A).

As Equações 1 a 3 também podem também ser usadas para calcular a capacidade de carga à compressão das estacas helicoidais. A diferença está que no caso de compressão, a hélice inferior mais a ponta da haste que resiste à compressão no lugar da hélice superior (caso de tração). Também no caso de compressão os parâmetros do solo relativos à hélice da ponta são equivalentes à resistência de ponta de uma estaca. Neste caso pode-se usar fatores de capacidade de carga N_q e N_c propostos em Meyerhof, para calcular a resistência de ponta de estacas.

De acordo com Perko (2009), há uma série de fenômenos que prejudicam a aderência no fuste. Em estacas de fuste quadrado o movimento de rotação da instalação cria um vazio circular entorno da haste (Figura 2.11), de forma que apenas as arestas ficam em contato com o solo (YOUNG, 2012). Além disso, a maioria das estacas são fabricadas com luvas de acoplamento que possuem diâmetro ligeiramente superior ao da haste, o que também cria espaço vazio ao redor do fuste. Por estas razões, na maioria dos casos, a resistência por

atrito lateral ou adesão nas hastes de extensão é negligenciada no cálculo da capacidade de carga (PERKO, 2009).

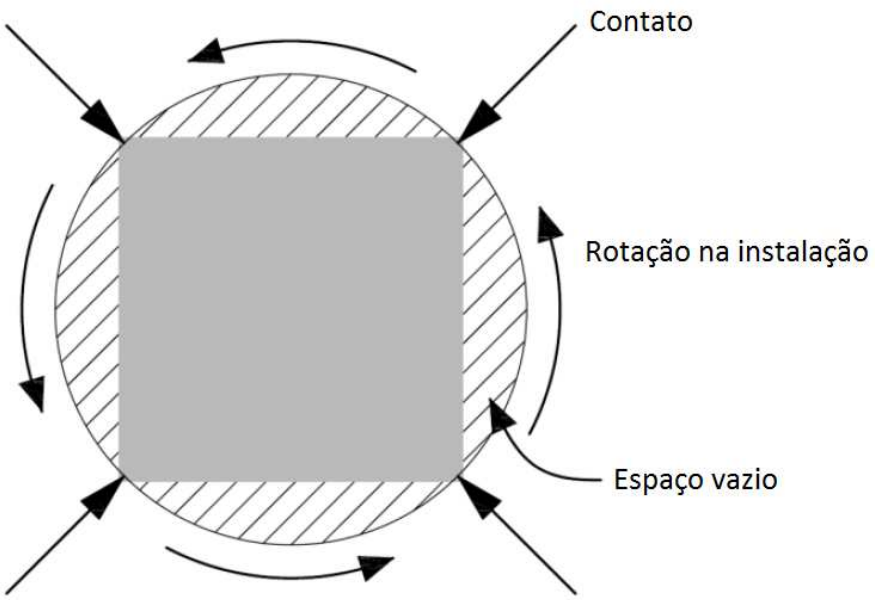


Figura 2.11: Instalação de estaca com fuste de seção quadrada representando o espaço vazio entre a barra e o solo devido à rotação. (Adaptado de YOUNG, 2012)

2.3.1. Método de capacidades individuais

Clemence et. al. (1994) afirmam que este método assume que a ruptura ocorre no solo acima de cada hélice individualmente quando solicitada em tração, e a capacidade de carga da estaca é dada pelo somatório das capacidades individuais (Equação 4). No caso de compressão o solo mobilizado é aquele abaixo das hélices (Figura 2.12 (a)). A Figura 2.12 (b) ilustra este método para o caso de tração.

$$P_{UT} = \sum_{i=1}^{n} q_{ult,i} \cdot A_i \tag{4}$$

onde:

$q_{ult,i}$: tensão de ruptura do solo acima da hélice H_i;

A_i: área efetiva da hélice H_i ($0{,}25.\pi.D_i^2$ - A_s)

A_s: área da seção transversal da haste ($0{,}25.\pi.D_s^2$).

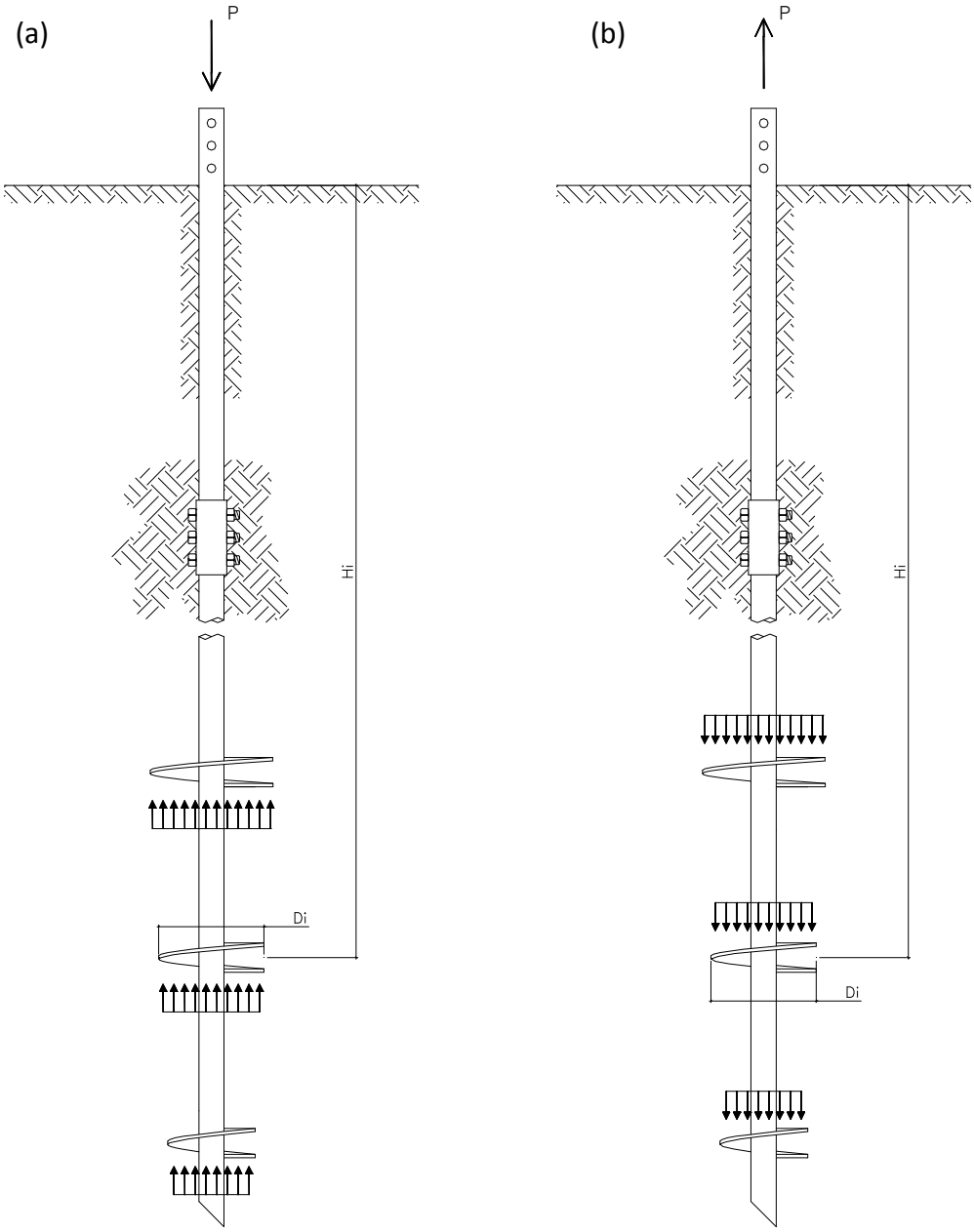


Figura 2.12: Diagrama de corpo livre de uma estaca helicoidal submetida a um esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método das capacidades individuais (Adaptado de PERKO, 2009).

A A. B. Chance Co. (2002) recomenda este método para o cálculo da capacidade das estacas helicoidais. De acordo com Tsuha (2007), para que este método apresente resultados coerentes, o espaçamento deve ser tal que uma hélice não exerça influência no comportamento da outra. Com base na experiência, a A. B. Chance Co. (2002) afirma que um espaçamento de três diâmetros é suficiente para que a consideração seja válida.

O diagrama de corpo livre mostrado na Figura 2.12 (a) apresenta a distribuição de forças idealizada em uma estaca helicoidal de *n* hélices, solicitada a compressão, pelo método das capacidades individuais.

Neste método, a tensão de ruptura de cada hélice (q_{ult}) à tração pode ser calculada pela equação da capacidade de carga de Terzaghi (1943), para elementos circulares, ou pela fórmula modificada de Meyerhof (1951) (Equação 5).

$$q_{ult} = 9c + \overline{q}N_q$$

(5)

onde:

c: coesão do solo;

$\overline{q}$: tensão efetiva do solo na hélice ($\gamma'.H_i$);

N_q: fator de capacidade de carga à tração ($= 0{,}5.(12\phi)^{\phi/54}$).

As mesmas considerações feitas para o método do "cilindro de cisalhamento" sobre negligenciar a resistência por atrito ou adesão ao longo da haste podem ser assumidas para o método das capacidades individuais.

Neste caso, a capacidade de carga da estaca é a somatória da capacidade de carga individual de cada hélice, tanto no caso de tração como no caso de compressão.

A capacidade de carga a tração de estacas helicoidais pode ser determinada através de procedimento similar ao já apresentado para carregamentos de compressão, desde que as estacas estejam suficientemente embutidas a uma profundidade tal que ocorra uma ruptura considerada profunda (A. B. CHANCE Co., 2002; PERKO e RUPIPER., 2000). A profundidade de embutimento mínima necessária para que a ruptura seja considerada profunda é apresentada na seção 2.4.2.

Dependendo do espaçamento entre as hélices e condições do subsolo, a estaca pode apresentar ruptura de acordo com os mecanismos que se baseiam os métodos das capacidades individuais ou do cilindro de cisalhamento (MERIFIELD, 2011).

2.4. INFLUÊNCIA DA INSTALAÇÃO E GEOMETRIA

O processo de instalação de ancoragens helicoidais causa modificações no solo acima das hélices. Estas modificações vão desde alterações nas tensões horizontais em solos arenosos (CLEMENCE e PEPE, 1984), geração de excessos de poro-pressão (VYAZMENSKY, 2005) e amolgamento de solos finos (WEECH, 2002). Por isso, têm sido sugeridas reduções de alguns parâmetros do solo, afim de considerar o efeito da perturbação causada pela instalação na avaliação da capacidade de carga, que pode ser feita através dos métodos freqüentemente usados em projetos de ancoragens helicoidais: cilindro de cisalhamento e capacidades individual (TSUHA et al., 2012).

De acordo com KULHAWY (1985), significativa modificação ocorre no interior da zona cilíndrica de instalação da ancoragem helicoidal e, como resultado, as ancoragens de uma hélice comportam-se de maneira similar a ancoragens em placa (instaladas e depois reaterradas). De acordo com este mesmo autor, o efeito da perturbação pode ser aproximado relacionando às propriedades modificadas com as propriedades *in situ*.

Mitsch e Clemence (1985) mostraram que a magnitude do coeficiente de empuxo atuante na superfície cilíndrica de solo entre hélices, mobilizada no carregamento, é de 30 a 40% menor do que os valores de coeficiente propostos por Meyerhof e Adams (1968) para fundações tracionadas convencionais, devido às modificações causadas pela instalação da estaca helicoidal. Estes mesmos autores recomendaram o uso dos coeficientes de empuxo (K_u) apresentados na Tabela 2.1, para estacas helicoidais em areia.

Tabela 2.1: Valores de K_u (MITSCH e CLEMENCE, 1985)

Ângulo de atrito do solo, ϕ (graus)	K_u recomendado para estacas helicoidais
25	0,70
30	0,90
35	1,50
40	2,35
45	3,20

Para o método das capacidades de carga individuais, a A. B. Chance Co. (2002) recomenda redução do fator de capacidade de carga N_q, embora não informe quanto.

A instalação de estacas helicoidais pode causar uma perturbação mínima no solo em comparação a outras técnicas convencionais de instalação. O mecanismo de penetração de estacas helicoidais tem sido investigado no Japão através de vários modelos de análise (KANAI, 2007). A Figura 2.13 apresenta um modelo para o movimento das partículas do solo em torno de uma hélice definido através da observação direta por câmera de vídeo. Durante a penetração da estaca, o solo na borda inferior da hélice inicia um movimento em direção a borda superior. Este fato causa o "afofamento" do solo dentro do cilindro acima das hélices. Tanto observações do perfil de solo como também medidas do empuxo de terra sustentam esta tendência. Neste experimento foi utilizado grão de arroz para modelar o solo (TSUCHIYA et al., 2007).

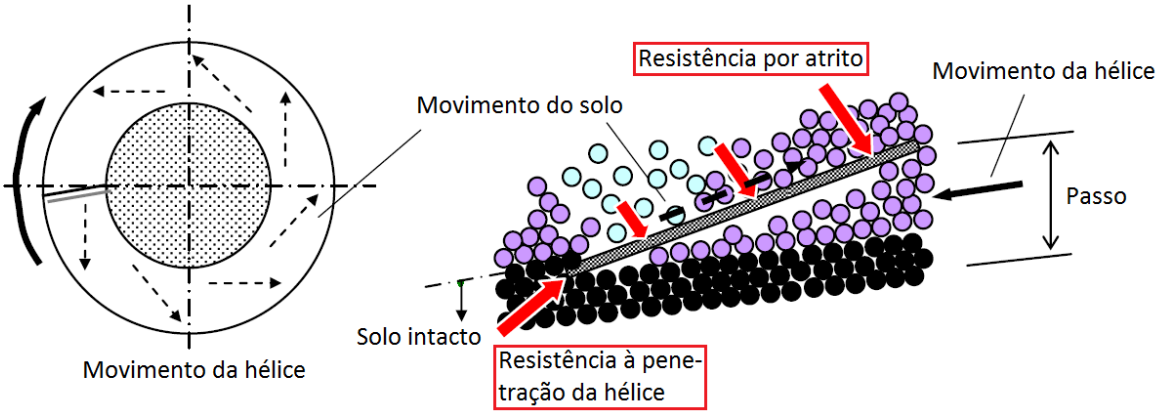


Figura 2.13: Mecanismo de penetração de uma hélice (Adaptado de KANAI, 2007).

De acordo com Tsuchiyta et al. (2007), sabe-se que o mecanismo de penetração anteriormente mencionado governa o comportamento da estaca sob carregamento. As estacas helicoidais podem ser classificadas em estacas de deslocamento, tais como as estacas cravadas, observando-se as características básicas de penetração. Segundo estes mesmos autores, devido a este mecanismo de penetração, o comportamento carga *versus* recalque da estaca é mais semelhante ao de uma estaca escavada, pois observa-se de uma região de solo desconfinado próximo as hélices.

Os solos lateríticos têm seu comportamento resistente bastante dependente da sua estrutura que, juntamente com a sucção, lhe confere grande estabilidade quando intacto e

não saturado (ALMEIDA et al., 2011). Inevitavelmente, o processo de instalação de estacas helicoidais em solos residuais estruturados (lateríticos e saprolíticos) provoca a quebra desta estrutura. A perturbação causada pela instalação diminui consideravelmente a capacidade de carga à tração destas estacas.

2.4.1. Influência do espaçamento entre hélices na forma de ruptura

De acordo com Perko (2009), a proximidade das hélices é um termo relativo, que depende da geometria da estaca e das condições do solo na vizinhança, o que geralmente não é previamente conhecido. Este espaçamento condiciona a forma de ruptura de acordo com os métodos de previsão de capacidade de carga (cilindro de cisalhamento e capacidades individuais) (Figura 2.14). Desta maneira, Perko e Rupiper (2000) sugerem que quando possível, a capacidade de carga seja determinada por ambos os métodos, 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 consistente.

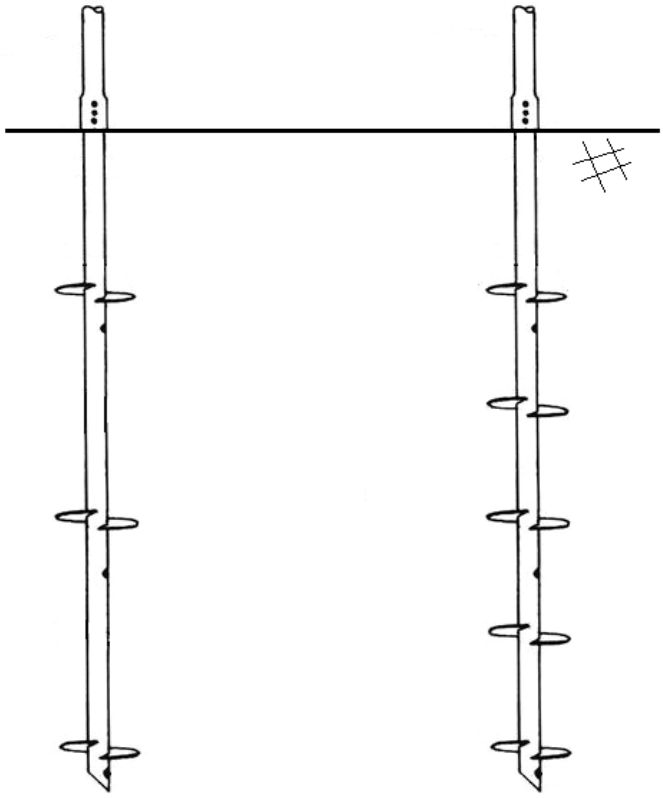


Figura 2.14: Estacas com diferentes espaçamentos entre hélices que condicionam a forma de ruptura de acordo com os métodos (a) capacidades individuais e (b) cilindro de cisalhamento (Adaptado de VYAZMENSKY, 2005).

Devido às hipóteses assumidas em cada modelo de cálculo da capacidade de carga, valores muito diferentes podem ser obtidos para uma determinada configuração de estaca. Assim, Perko (2009) afirma que diversos estudos laboratoriais tem sido desenvolvidos com o intuito de se determinar o espaçamento onde ocorre a transição dos modos de ruptura. Para Perko e Rupiper (2000) e A. B. Chance Co. (2002), quando o espaçamento entre as hélices é de aproximadamente três diâmetros, os resultados dos dois métodos se aproximam independentemente do tipo de solo. Já Lutenneger (2011) afirma que a transição entre os mecanismos que ruptura ocorre quando o espaçamento relativo é igual a 3, para areias, e 2,5 para argilas. Baseado em análises por elementos finitos que foram posteriormente comparadas com ensaios realizados por Narasimha Rao et al. (1991, 1993), Merifield (2011) concluiu que o espaçamento crítico é igual a aproximadamente 1,6, para argilas.

2.4.2. Influência da profundidade na forma de ruptura

Mitsch e Clemence (1985) estudaram a superfície de ruptura do solo em torno de ancoragens helicoidais e observaram que para uma pequena relação H_1/D_1 a superfície de ruptura acima da hélice de topo estendesse até a superfície do terreno. Nesta expressão, H_1 é a distância da hélice do topo até a superfície do terreno e D_1 é o diâmetro desta hélice.

O comportamento na ruptura das estacas helicoidais é separado em rasas e profundas, baseado na relação H_1/D_1. Os valores limites da razão $H_1/D_1 = (H_1/D_1)_{cr}$, que separam o comportamento das estacas em rasas e profundas, é denominado razão critica. Para solos arenosos, a variação de $(H_1/D_1)_{cr}$ é dada em função do ângulo de atrito interno do solo. Já para solos argilosos, esta variação é dada em função da coesão (DAS, 1990).

A depender do ângulo de atrito do solo e da relação H_1/D_1 a superfície de ruptura pode ou não atingir a superfície do terreno. Quando isto ocorre diz-se que a ancoragem é profunda (DAS, 1990). Para Mitsch e Clemence (1985), areias com densidade relativa entre 44% e 90% a relação $(H_1/D_1)_{cr}$ é 5. De acordo com Stephenson (2003), uma razão H_1/D_1 igual a três já é suficiente para que a ruptura seja considerada profunda, independentemente do tipo de solo. A A. B. Chance Co. (2002), explica que tem sido relatado por diversos pesquisadores que a razão crítica varia entre 3 e 8. A companhia recomenda 5 como o valor a ser utilizado nos projetos.

Das (1990) apresenta na Tabela 2.2 a variação da razão critica com o ângulo de atrito interno do solo. Para solos argilosos a razão critica é calculada pela Equação 6, onde a coesão é dada em kPa (DAS, 1990).

Tabela 2.2: 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

$$\left(\frac{H_1}{D_1}\right)_{cr} = 0{,}107c + 2{,}5 \leq 7 \qquad (6)$$

2.5. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA INSTALAÇÃO ATRAVÉS DE COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

De acordo com Trofimenkov e Mariupolskii (1965), a capacidade de carga de uma estaca helicoidal com uma única hélice, submetida à compressão, é maior do que no caso de tração, devido aos seguintes fatores: (a) no ensaio de compressão o carregamento na hélice é resistido pelo solo intacto; (b) a área de hélice que trabalha na compressão na estaca é maior que a área que trabalha em tração por conta da área da ponta da haste; (c) a densidade do solo geralmente aumenta com a profundidade. Eles concluíram por meio de provas de carga que a capacidade de carga a compressão é cerca de 1,4 a 1,5 vezes a capacidade de carga a tração da estaca.

Hargrave e Thorsten (1992) comentam que na compressão, a primeira hélice apóia-se sobre solo praticamente intacto, e na tração, a última hélice apóia-se em solo afetado pela passagem das hélices e instalação da guia.

A Figura 2.15 ilustra os esforços mobilizados em uma estaca helicoidal de duas hélices, quando submetida à tração e a compressão. A capacidade de carga a tração (P_{UT}) de uma estaca helicoidal é inferior a capacidade de carga a compressão (P_{UC}) devido aos seguintes fatores:

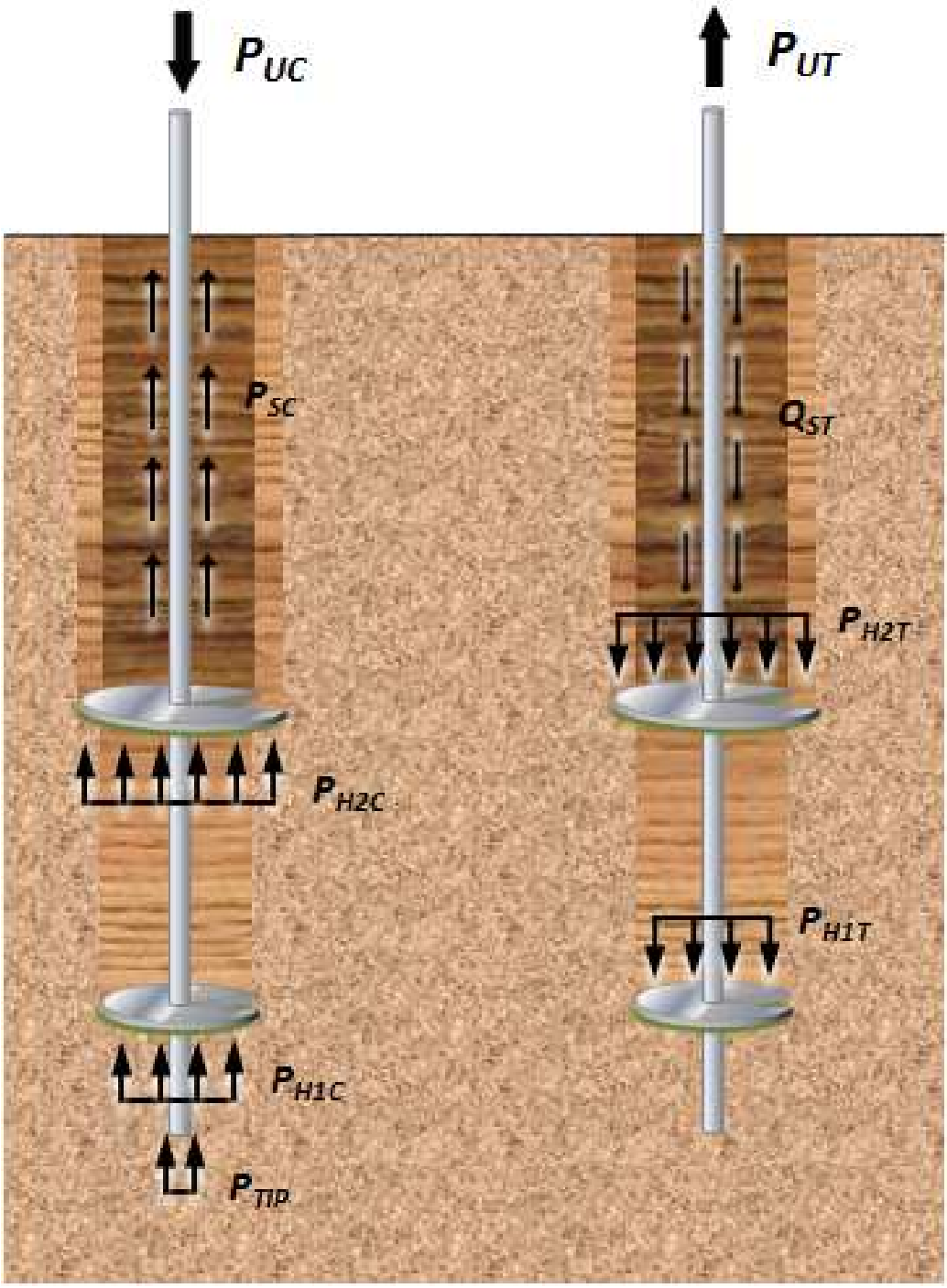


Figura 2.15: Forças mobilizadas por uma estaca helicoidal submetida a tração e a compressão.

1. Efeito da instalação na capacidade relativa à hélice da ponta (H1). Portanto: $P_{H1T}<<<P_{H1C}$ (na compressão, a hélice H1 está apoiada em solo intacto);

2. Efeito da instalação na capacidade relativa à segunda hélice (H2). Portanto: $P_{H2T}<P_{H2C}$ (na compressão a hélice H2 está apoiada em solo atravessado por hélice uma vez, na tração, o solo de apoio é cortado duas vezes por hélices durante a instalação);

3. Resistência de ponta da estaca solicitada a compressão. Na tração não existe esta contribuição. Observar P_{TIP} na Figura 2.15;

4. Efeito Poisson na resistência por atrito lateral. Na compressão, há um aumento da seção devido à deformação elástica (direção radial) do fuste. Na tração ocorre o contrário.

A diferença entre capacidade de carga a tração e compressão depende em grande parte do efeito da instalação da hélice no solo solicitado a tração, que é de capacidade inferior ao solo intacto na compressão, no caso da hélice da ponta (H1).

Kanai (2007) realizou provas de carga instrumentadas à compressão em estacas helicoidais de quatro hélices e mostrou que a maior parte da capacidade de carga a compressão da estaca é devido à hélice da ponta apoiada em solo intacto. No entanto, é importante ressaltar que, observando os perfis de sondagem apresentados por Kanai (2007), o solo cuja resistência é mobilizada pela hélice da ponta é mais resistente do que o mobilizado pelas demais hélices.

Além disso, os resultados mostram que mesmo as hélices superiores não estando apoiadas em solo intacto, na compressão a contribuição de cada hélice em termos de capacidade de carga é maior do que na tração. O solo solicitado à compressão sempre é penetrado um número menor de vezes, além disso, ocorre certa compactação abaixo das hélices durante a instalação.

Sendo assim, a razão entre a capacidade de carga a compressão e a tração é um indicativo do efeito da instalação, que indica a sensibilidade do solo à modificação causada pela instalação das hélices. Na Tabela 2.3 são apresentados valores encontrados na literatura. Esta tabela mostra que os valores da razão P_{UC}/P_{UT} variam entre 1,2 e 2,3, ou seja, a capacidade de carga a tração é sempre inferior a capacidade de carga a compressão.

Tabela 2.3: Comparação entre valores de P_{UC}/P_{UT} encontrados na literatura.

Referência	Critério de ruptura/ curva carga *x* recalque	Solo da ponta da estaca	P_{UC}/P_{UT}
Trofimenkov & Mariupolskii (1965)	10%D	Argila mole a rija/ areia fofa a compacta	1,4 a 1,5
Zhang (1999)	10%D	Argila e areia	2
Kanai (2007)	10%D	Pedregulhos	1,8
Livneh & El Naggar (2008)	8%D + desloc. elástico	Silte argiloso	1,8 a 2
Livneh & El Naggar (2008)	8%D + desloc. elástico	Areia fina compacta	2,3
Sakr (2009)	10%D	Areia betuminosa	2
Perko (2009)	Carga máxima (pico)	Depósito glacial	1,2
Projeto anterior com estacas ancoradas em solo residual brasileiro	10%D	Areia siltosa (solo residual) N_{SPT}~20	1,3

Os valores apresentados na Tabela 2.3, com exceção do último, foram obtidos de ensaios realizados em solos de clima temperado. Este último valor refere-se à prática de estacas helicoidais no Brasil, mais especificamente, uma linha de transmissão na região de Votuporanga-SP. Estacas multi-hélices com seções guia instaladas em solos residuais de arenito, abaixo do nível d'água e com N_{SPT} em torno de 20 golpes/0,3 m, têm mostrado a relação entre capacidade de carga à compressão e à tração (P_{UC}/P_{UT}) em torno de 1,3, semelhante aos valores encontrados na literatura, indicados da Tabela 4.3.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos usados para o desenvolvimento desta pesquisa, que foi realizada com base em experimentos realizados em duas áreas (terrenos) distintas:

- Área 1: localizada no CRHEA em Itirapina (SP)
- Área 2: localizada em Betim (MG).

As campanhas e procedimentos de ensaios das duas áreas foram diferentes. No entanto, nos dois casos o objetivo dos ensaios foi avaliar o efeito da instalação no solo residual testado e consequentemente na capacidade de carga à tração de estacas helicoidais.

3.1. ENSAIOS ÁREA 1

A Área 1 fica localizada no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). O CRHEA está situado no km 13 da rodovia Domingos Innocentini, município de Itirapina/SP, às margens da Represa do Lobo e distante aproximadamente de 25 km do Campus 1 da EESC. Neste terreno, até o momento, foram desenvolvidos dois trabalhos de mestrado (SANTOS, 2013 e o presente).

Neste local foram realizadas duas provas de carga a compressão em estacas helicoidais para comparação com os resultados de provas de carga a tração realizadas por Santos (2013). Em cada uma das provas de carga a compressão foi realizado um ciclo de descarregamento e recarregamento. O objetivo destes ensaios foi avaliar o efeito da instalação da estaca comparando-se a capacidade de carga à tração, que depende do solo perturbado acima da hélice, com a capacidade à compressão, que depende do solo intacto abaixo da hélice no caso de estacas com uma única hélice.

Além disso, nesta campanha foram retiradas amostras indeformadas de solo, por meio de um poço de investigação escavado ao lado de uma estaca, para realização de ensaios laboratoriais.

3.1.1. Provas de carga

Foram realizadas duas provas de carga a compressão em estacas anteriormente ensaiadas a tração por Santos (2013). As estacas ensaiadas possuem hélices de 200 mm de diâmetro e passo de 75 mm e foram fabricadas e instaladas pela Asel-Tech. As características das seções guia são apresentadas na Figura 3.1.

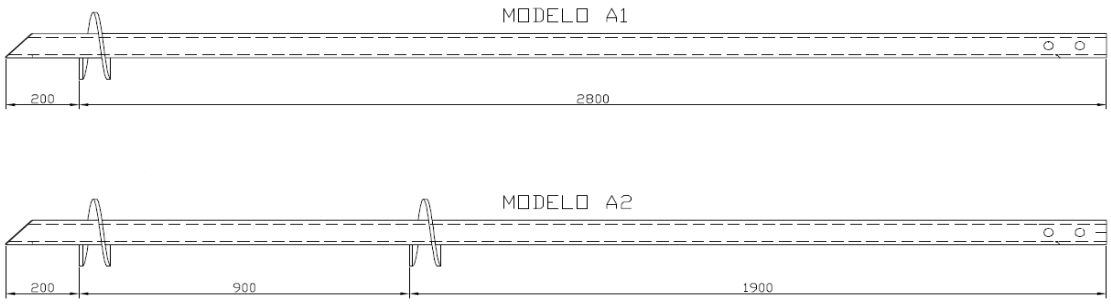


Figura 3.1: Seções guia das estacas ensaiadas no Campo Experimental do Broa – Medidas em milímetros (Adaptado de Santos, 2013).

Em seu trabalho, Santos (2013) realizou nove provas de carga a tração. Para caracterização da área foram realizadas sondagens SPT e CPT. A Figura 3.2 apresenta o perfil representativo do terreno. De acordo com Nishiyama (1991), a camada de silte arenoso identificada nas sondagens é um solo residual de diabásio.

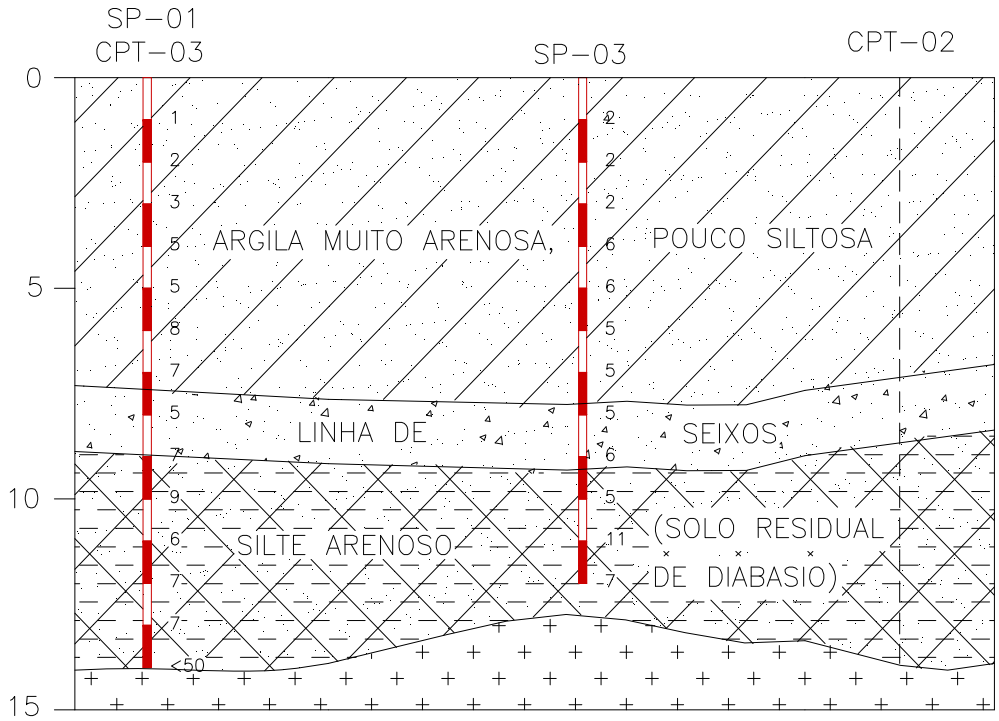


Figura 3.2: Perfil geotécnico provável da Área 1 (Medidas em metros).

As estacas foram instaladas por retro-escavadeira onde foi acoplado um motor hidráulico. Foram adicionados tubos de extensão até que a ponta das estacas alcançasse 10,0 m de profundidade. A conexão entre as seções das estacas foi do tipo ponta e bolsa com parafusos. O torque de instalação foi anotado a cada 0,5 m e era obtido por meio de medidor de pressão diferencial. A locação das estacas é apresentada na Figura 3.3.

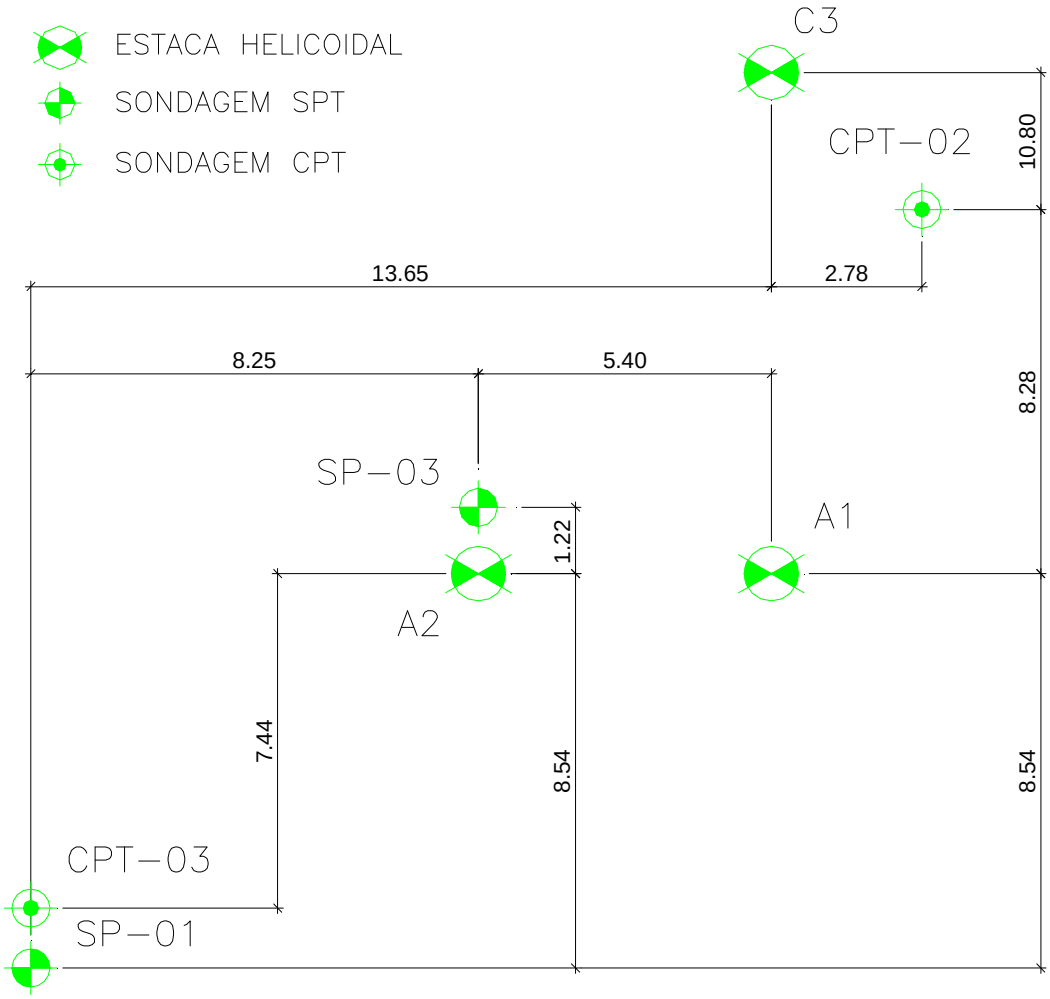


Figura 3.3: Locação das estacas na Área 1 (Medidas em metros).

As provas de carga a compressão realizadas foram do tipo rápida, de acordo com a NBR 12131 (2006). O carregamento foi aplicado em estágios, sendo realizadas leituras dos deslocamentos da cabeça da estaca a cada cinco minutos, independentemente da ocorrência de estabilização. O sistema de reação consistiu-se de um perfil I metálico ligado a estacas de reação, onde o carregamento foi introduzido por macaco hidráulico com capacidade de 500 kN conectado a uma bomba manual. Os deslocamentos foram medidos através de quatro relógios comparadores de curso igual a 50 mm e resolução de 0,01 mm.

A aferição da carga aplicada foi feita por célula de carga com capacidade de 500 kN e resolução de 1 kN. As estacas de reação foram tipo escavada a seco de ϕ50, armadas em todo comprimento com uma barra Dywidag 85/105 de ϕ32 complementada com 6 ϕ12.5 e estribos ϕ6.3 c/15, ambos CA-50. A armadura complementar foi colocada no 1,5 m mais próximo a superfície. A Figura 3.4 apresenta a montagem típica das provas de carga realizadas.

Figura 3.4: Sistema de reação e arranjo geral das provas de carga realizadas no Broa.

3.1.2. Amostragem e ensaios de laboratório

A fim de avaliar a perda de resistência do solo devido à desestruturação causada pela instalação da estaca foram retiradas amostras indeformadas da camada de solo saprolítico, onde as hélices das estacas ficaram instaladas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC.

Dois blocos indeformados foram retirados por meio de um poço de investigação de 9,5 m de profundidade. Um bloco foi retirado em região distante das hélices para a verificação das condições do solo intacto, e outro bloco foi retirado próximo (aproximadamente 50 mm, ver Figura 3.6) à hélice H2 da estaca C3, para verificar o efeito da instalação nas propriedades

iniciais do solo. Na Figura 3.6 estão indicadas as posições dos blocos em relação ao poço de investigação e a estaca.

Os blocos retirados tinham formato cúbico com 250 mm de aresta. Após a retirada foram parafinados e acondicionados em câmara úmida. A Figura 3.5 mostra um dos blocos e a caixa metálica utilizada na coleta e transporte. O bloco perturbado foi retirado após a prova de carga de tração realizada por Santos (2013), próximo a estaca C3.

Figura 3.5: Amostra indeformada e caixa de amostragem/transporte.

Uma das amostras (solo perturbado) foi retirada da região ao lado da estaca, após a realização da prova de carga. A localização dos blocos em relação à estaca e o esquema do poço são mostrados na Figura 3.6.

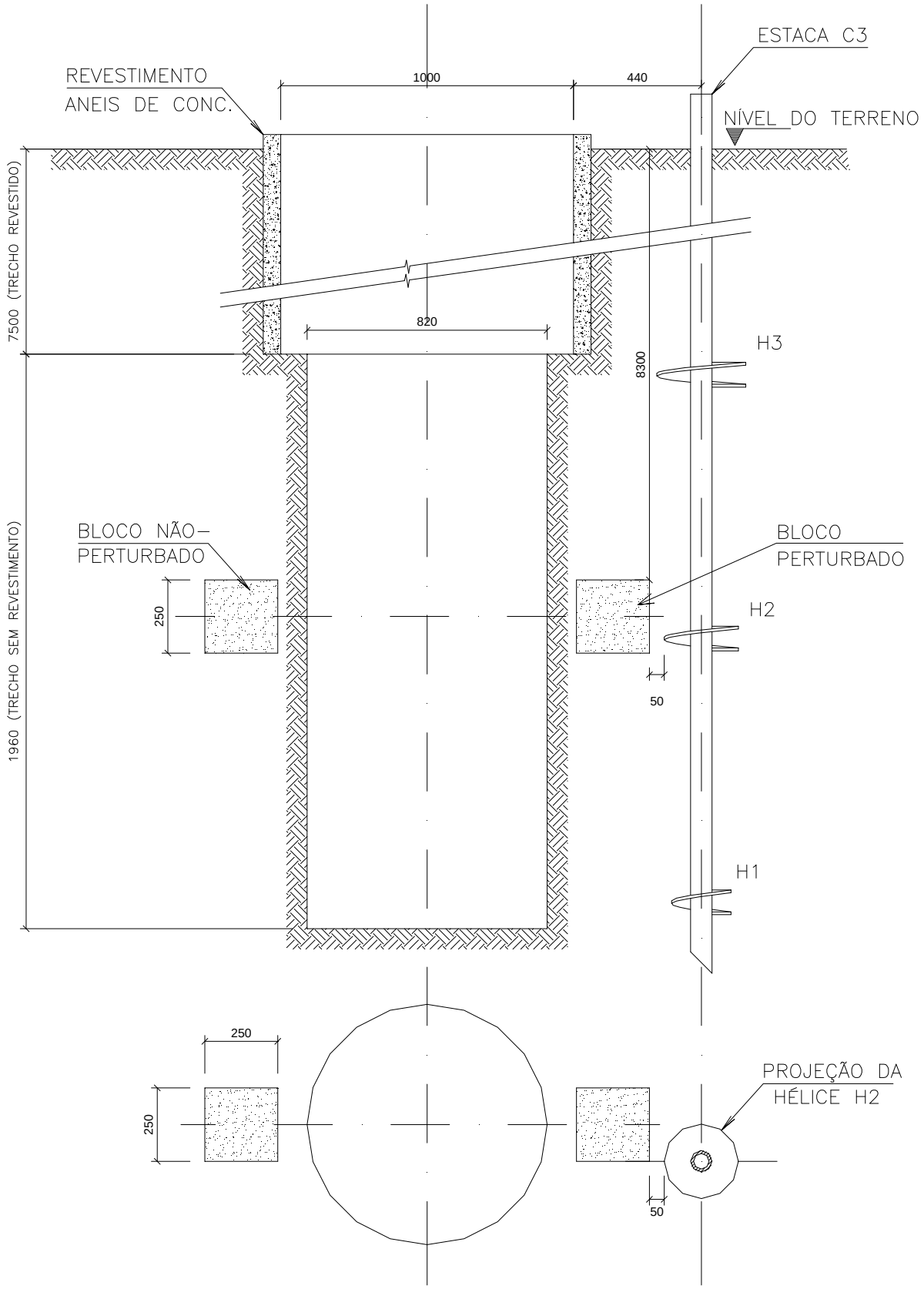


Figura 3.6: Detalhe do poço de investigação e local de retirada das amostras indeformadas – Medidas em milímetros.

A indicação da direção da estaca C3 para locação do bloco a ser retirado foi feita através de prumo de centro. Quando ao final da escavação para retirada do bloco, notou-se um desalinhamento do centro do bloco em relação à estaca. Isto pode ser atribuído a um possível desaprumo durante a instalação da estaca. O desaprumo observado foi da ordem de 1%. A Figura 3.7 indica a posição da estaca em relação ao bloco.

Figura 3.7: Indicação do bloco em relação a estaca C3 na ocasião da coleta.

Outro bloco foi retirado da extremidade oposta do poço na mesma cota, este servindo como referência, solo intacto (não-perturbado).

Os ensaios de resistência realizados com as amostras foram: compressão triaxial tipo adensado não drenado com medida de pressão neutra (de acordo com a ASTM D 4767, 2011) e compressão não confinada (de acordo com a NBR 12770, 1992). Os ensaios de resistência foram realizados a partir de corpos de prova talhados de 50 x 120 mm, aproximadamente. A Figura 3.8 apresenta as etapas de confecção dos corpos de prova cilíndricos.

Os ensaios de caracterização das amostras realizados foram: granulometria conjunta (NBR 7181, 1984), massa específica dos grãos (NBR 6508, 1984), limite de liquidez (NBR 6459, 1984) e de plasticidade (NBR 7180, 1984).

(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.8: (a) Corte do prisma a partir do bloco parafinado; (b) paralelização e planificação das faces; (c) prisma colocado no torno e moldagem para desbaste das laterais; (d) corpo de prova pronto.

3.2. ENSAIOS ÁREA 2

As provas de carga realizadas em Betim/MG foram feitas no pátio da empresa Vercon Industrial, que fica localizada na Av. Juiz Marco Túlio Isaac, Riacho das Areias. Lá foram realizadas três provas de carga a tração, sendo duas instrumentadas ao longo do comprimento da estaca e uma sem instrumentação. Neste local, também foi instalada uma estaca com intuito de verificar, através de injeção de material de preenchimento, a ocorrência de zonas de solo enfraquecido ou vazios provenientes da instalação.

Nas provas de carga instrumentadas (denominadas IN1 e IN2), além da instrumentação para medição do esforço de tração desenvolvido durante a prova de carga, foi também implantada instrumentação para medição do torque desenvolvido na haste durante a instalação. Isso não foi feito em pesquisas anteriores. Esta instrumentação foi utilizada com o intuito de separar as parcelas de torque necessário a instalação e suas respectivas contribuições na capacidade de carga. As provas de carga instrumentadas foram realizadas em estaca com tubo da seção guia de diâmetro reduzido em relação às hastes de extensão.

Foram realizadas duas sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT para caracterizar o solo do local dos testes. A locação das sondagens e das estacas ensaiadas está apresentada na Figura 3.9.

Além das hélices, o tubo que constitui a seção guia também é responsável pela perturbação causada ao solo durante a instalação. Para avaliar se há diminuição da perturbação do solo causada pelo tubo da seção guia, fez-se a instalação e prova de carga numa estaca com tubo da seção guia de diâmetro igual ao das extensões (denominada NIN) e em estaca com a seção guia de diâmetro de haste reduzido.

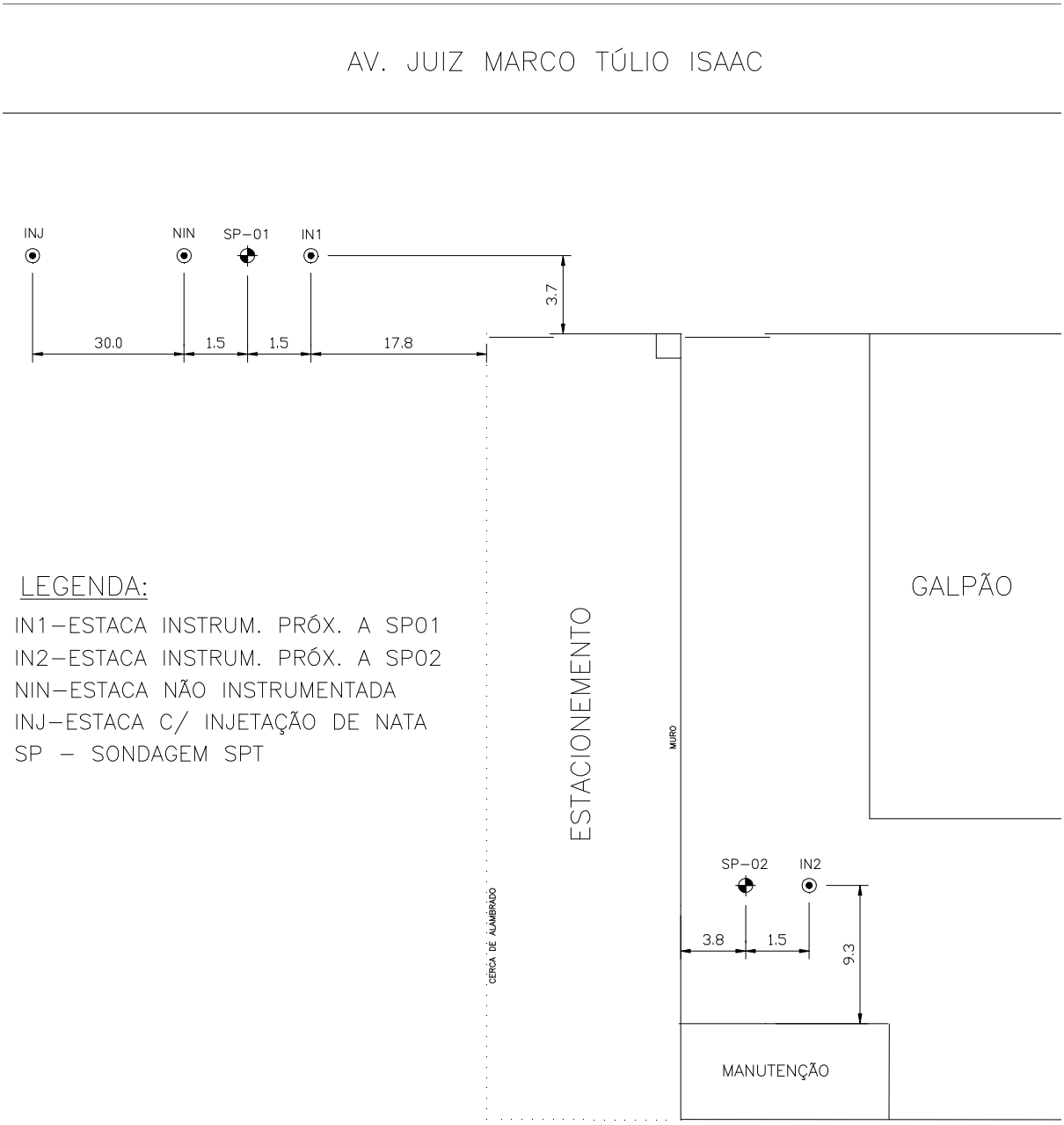


Figura 3.9: Localização dos furos de sondagem e das estacas ensaiadas.

3.2.1. Provas de carga instrumentada

Nas provas de carga instrumentadas procedeu-se a medição do esforço da tração desenvolvido durante a prova de carga, em duas seções, ao longo da seção guia da estaca. Durante a instalação da estaca também foram feitas leituras do torque de instalação a cada 0,25 m e do esforço de torção desenvolvido através de instrumentação implantada nas seções.

A estaca testada era composta por uma seção guia com quatro hélices circulares e tubo de 73,0 mm de diâmetro, por 7,82 mm de espessura. Os tubos de extensão utilizados para prolongamento da estaca tinham 101,6 mm de diâmetro.

A estaca foi fabricada pela Vercon Industrial. Os dois testes foram realizados em uma mesma estaca, sendo esta instalada, desinstalada e reinstalada. Foram implantadas, na seção guia duas seções instrumentadas para medição de força e torque (seções S1 e S2). Na Figura 3.10 são apresentados os detalhes da guia utilizada e o posicionamento das seções instrumentadas.

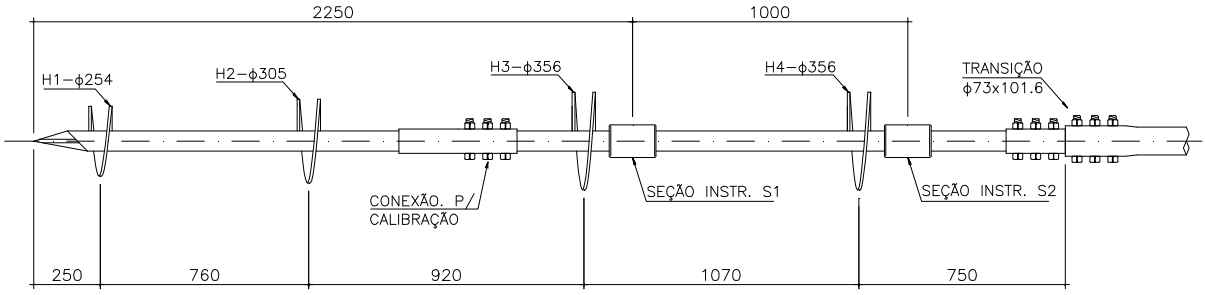


Figura 3.10: Seção guia instrumentada – Posição da instrumentação e dimensões (Medidas em milímetros).

3.2.1.1. Instrumentação

A instrumentação baseia-se em extensômetros elétricos arranjados em forma de Ponte de Wheatstone montadas, de acordo com o esforço a ser medido, das seguintes formas:

- Força: ponte completa com quatro extensômetros ativos, modelo unidirecional simples PA-06-125BA-350-LEN;
- Torque: quarto de ponte a dois fios com um extensômetro ativo, modelo unidirecional a 45° PA-06-125CX-350-L.

Os extensômetros utilizados são para aço, do tipo coláveis, com base de poliamida e resistência nominal de 350 Ω. Sendo fabricados e comercializados pela Excel Engenharia de Sensores. A Figura 3.11 mostra os circuitos de medição montado em cada seção instrumentada. As ligações dos circuitos foram feitas utilizando-se cabo Vishay modelo 326-DFV. Este cabo possui três fios condutores de cobre estanhados com 0,404 mm de diâmetro (26 AWG) e é indicado para usos gerais. Após as efetuadas as ligações, os cabos foram

inseridos no interior da estaca através de um furo no tubo da seção guia, como apresentado na Figura 3.11.

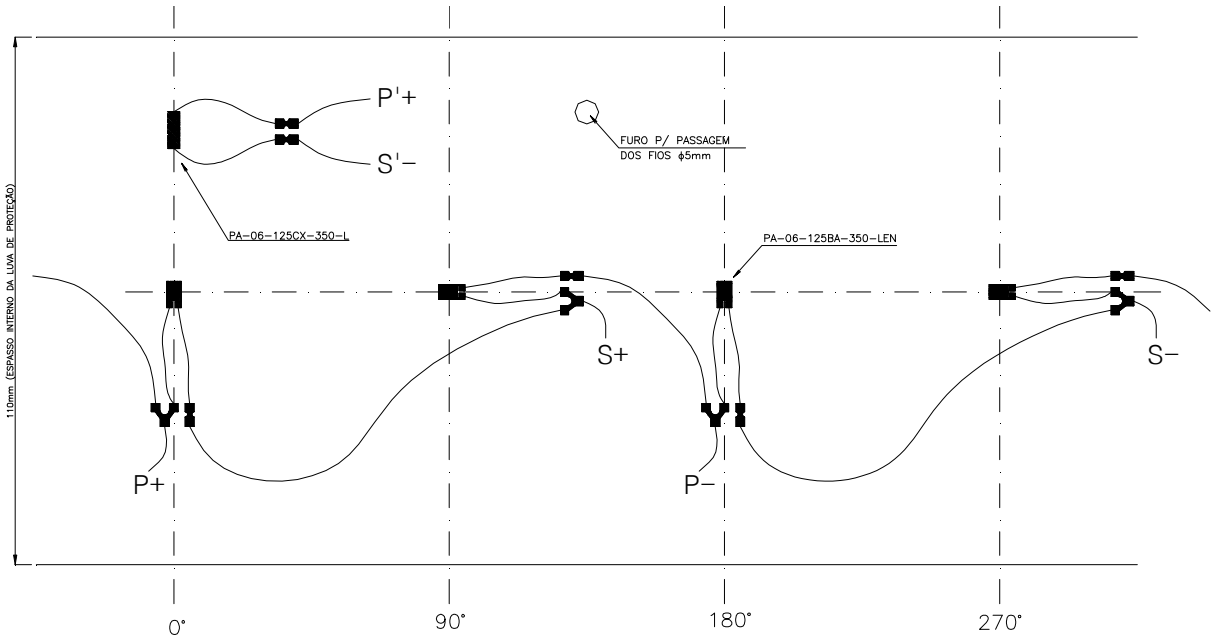


Figura 3.11: Disposição dos extensômetros e ligações dos circuitos de medição.

Devido às formas de ligação adotadas, em cada seção instrumentada foram necessários seis fios condutores, na Figura 3.11, denominados (P+, P-, S+, S-, P'+ e S'-), e, portanto, dois cabos de ligação. No entanto, como estes cabos são consideravelmente frágeis, optou-se por fazer a condução, a partir da seção guia, utilizando-se cabos de maior resistência mecânica. Os cabos utilizados foram do tipo flexível PP de seção nominal 4 x 1,0 mm² fabricados pela Condumig Industria de Condutores Elétricos de Minas Gerais Ltda. A emenda dos cabos foi realizada utilizando-se solda de estanho e para impermeabilização aplicou-se fita isolante auto-fusão. A Figura 3.12 apresenta os cabos de ligação pelo interior do tubo da seção guia e, posteriormente, os cabos de condução já emendados.

(a) (b)

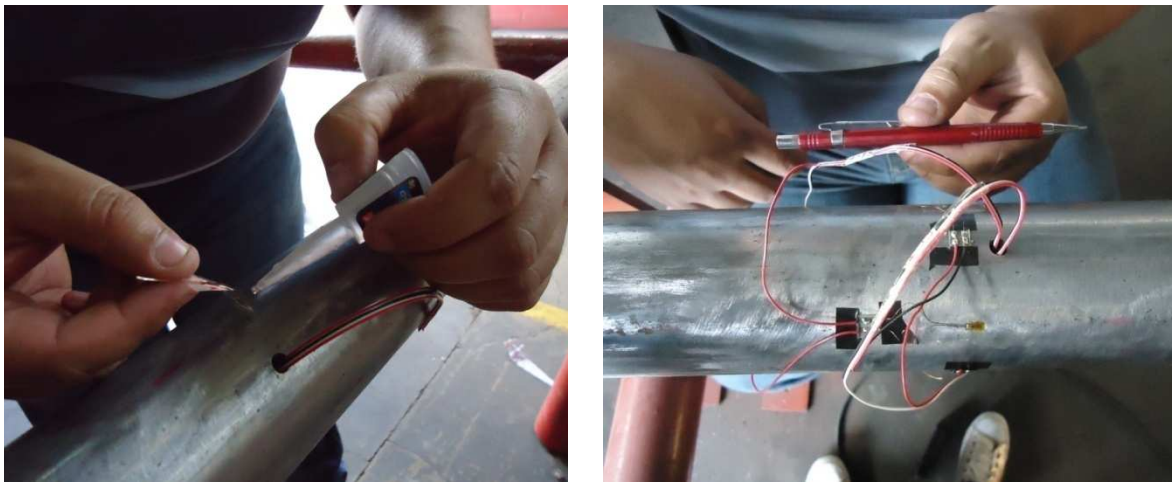
Figura 3.12: Topo da seção guia: (a) cabos de ligação e (b) cabos de condução, após emenda.

A preparação da superfície, que precede o procedimento de colagem, consistiu de: limpeza com solvente, lixamento (lixas tipo mini-rodas P60 e P120), limpeza com álcool isopropílico e aplicação de condicionador e neutralizador (Figura 3.13 (a) e (b)).

(a) (b)

Figura 3.13: Etapas de preparação da superfície: (a) lixamento e (b) limpeza com álcool.

No procedimento de colagem utilizou-se adesivo a base de cianoacrilato (Figura 3.14 (a)). A Figura 3.14 (b) mostra um dos extensômetros colados e os fios de ligação que compõem o circuito.



(a) (b)

Figura 3.14: (a) Procedimento de colagem, (b) extensômetro colado e fios de ligação.

Como a instrumentação foi implantada na parte externa do fuste, foram projetadas luvas bipartidas para proteção mecânica e impermeabilização (Figura 3.15 (a)). Os desenhos do

projeto das luvas são apresentados no Apêndice B. Sobre os extensômetros, na parte interna das luvas de proteção, foi aplicada uma camada de fita isolante auto-fusão. Devido ao comprimento da seção guia, optou-se por seccioná-la com o intuito de facilitar o manuseio durante o processo de calibração (Figura 3.15 (b)).

(a) (b)

Figura 3.15: (a) Luvas para proteção mecânica, (b) parte da seção guia com as seções S1 e S2.

No ponto onde a seção guia foi seccionada, executou-se uma conexão tipo ponta e bolsa, parafusada. Os parafusos utilizados na ligação foram de 22,2 x 165,1 mm. A Figura 3.16 apresenta o detalhe da ligação para calibração da seção guia instrumentada.

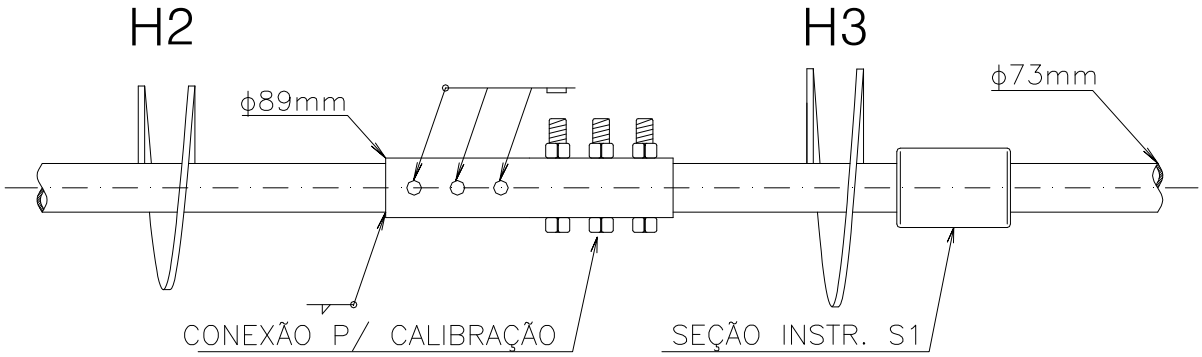


Figura 3.16: Detalhe da ligação para calibração.

3.2.1.2. Calibração da instrumentação

Foi projetado um pórtico de reação para calibração da instrumentação responsável pela medição do esforço de tração. A Figura 3.17 mostra o esquema de montagem da estaca no pórtico. Como não há modificação da rigidez axial das seções instrumentadas, não é necessário utilização de seção de referência na prova de carga, freqüentemente empregada em provas de carga instrumentadas em estacas de concreto.

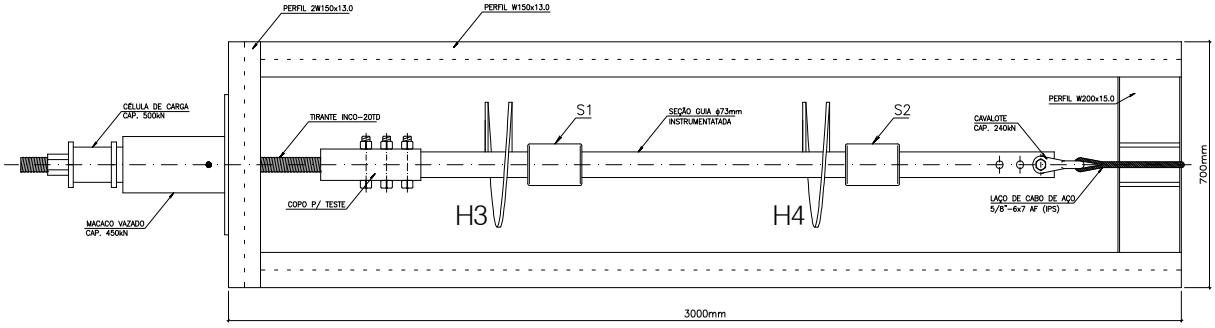


Figura 3.17: Esquema da montagem para calibração da instrumentação: Tração.

A calibração da instrumentação para medição de esforço de tração das duas seções foi feita simultaneamente. O procedimento de calibração consistiu na aplicação de carregamentos às seções instrumentadas em estágios de 10 kN até 200 kN, sendo medidas as correspondentes respostas da instrumentação por meio de sistema de aquisição de dados. O mesmo sistema de aquisição foi utilizado nas provas de carga. As cargas foram aplicadas utilizando um macaco vazado e foram aferidas por célula de carga. A Figura 3.18 apresenta a montagem da seção guia instrumentada no pórtico e o detalhe do sistema de aplicação e aferição de carregamento.

(a)

(b)

Figura 3.18: Calibração da instrumentação para esforço de tração (a) vista geral do pórtico com a estaca e (b) detalhe da célula de carga e macaco vazado.

Como resultado da calibração obtiveram-se os gráficos na Figura 3.19 (seção S1) e na Figura 3.20 (seção S2).

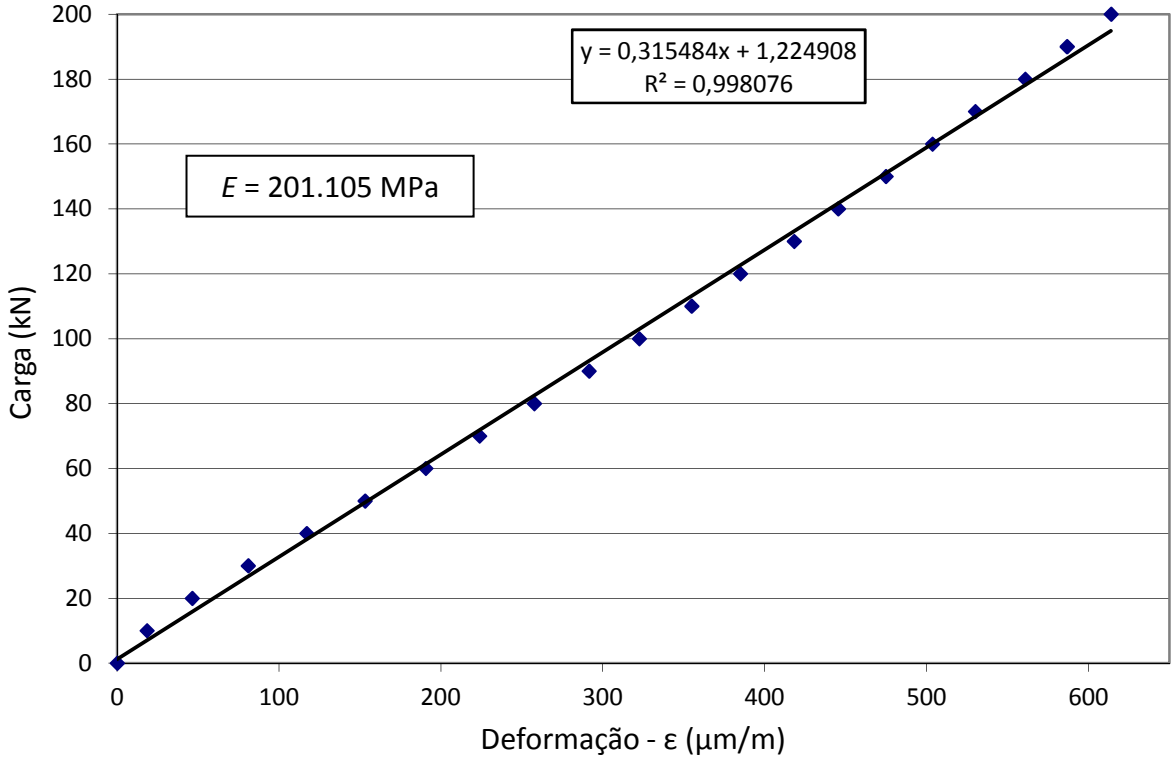


Figura 3.19: Calibração – Seção S1: Força.

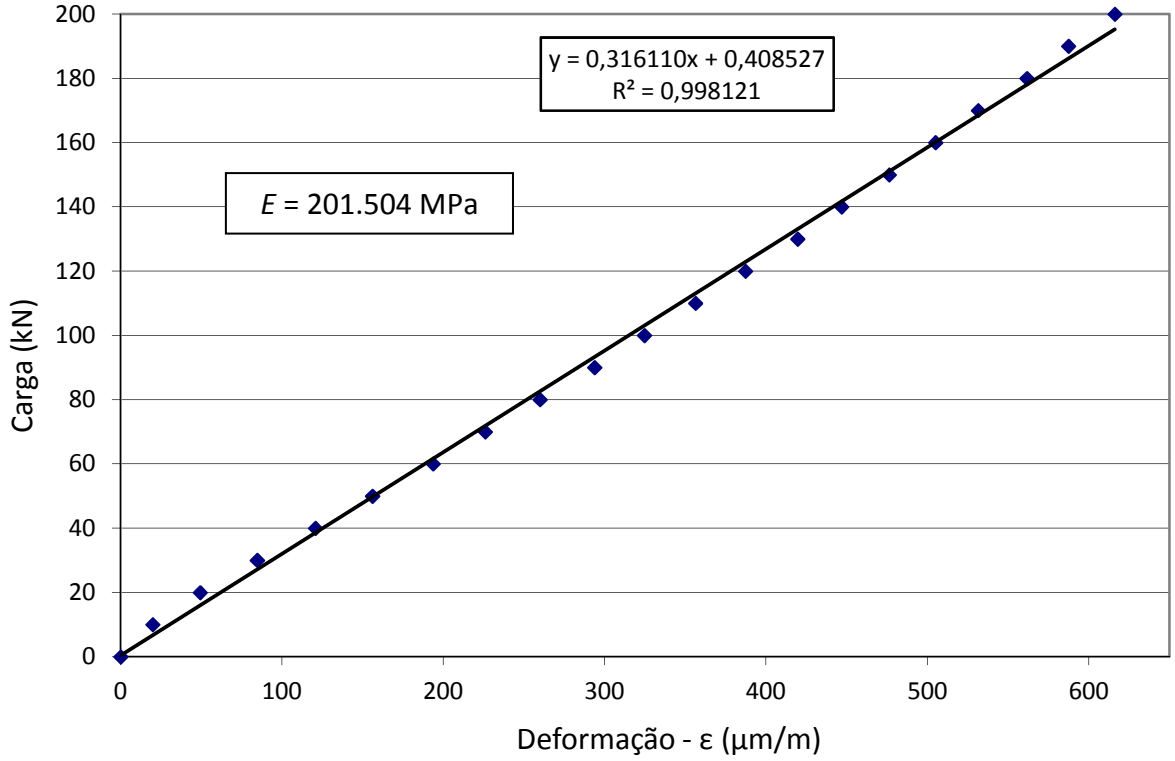


Figura 3.20: Calibração – Seção S2: Força.

Para calibração da instrumentação responsável pela medição do torque utilizou-se o próprio equipamento de instalação (para aplicação do torque) e uma estaca anteriormente instalada (como elemento de reação). A estaca utilizada como reação na calibração foi instalada até um torque final de 23 kN.m. O procedimento consistiu na aplicação de torques crescentes, aferidos por meio de torquímetro, e correspondente medição das respostas da instrumentação por meio de sistema de aquisição de dados. O mesmo sistema de aquisição foi utilizado nas instalações instrumentadas. A Figura 3.21 apresenta os detalhes da montagem realizada para calibração.

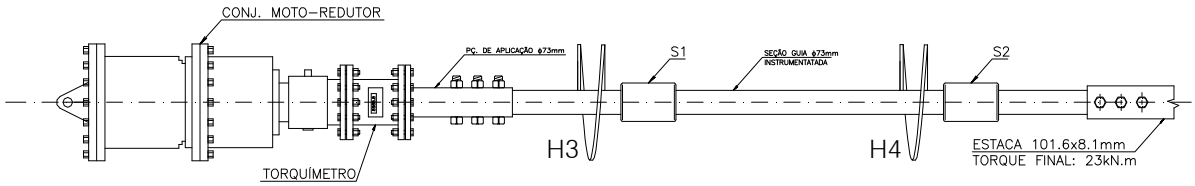


Figura 3.21: Esquema da montagem para calibração da instrumentação: Torque.

O torque máximo aplicado foi de, aproximadamente, 11 kN.m. Não foi possível aplicar estágios bem definidos devido a pouca sensibilidade dos comandos hidráulicos do equipamento. As duas seções foram calibradas simultaneamente. A Figura 3.22 apresenta a montagem da estaca para calibração.

(a) (b)

Figura 3.22: Calibração da instrumentação para medição de torque (a) estaca instrumentada (b) vista geral da montagem.

Como resultado da calibração obtiveram-se os gráficos na Figura 3.23 (seção S1) e na Figura 3.24 (seção S2).

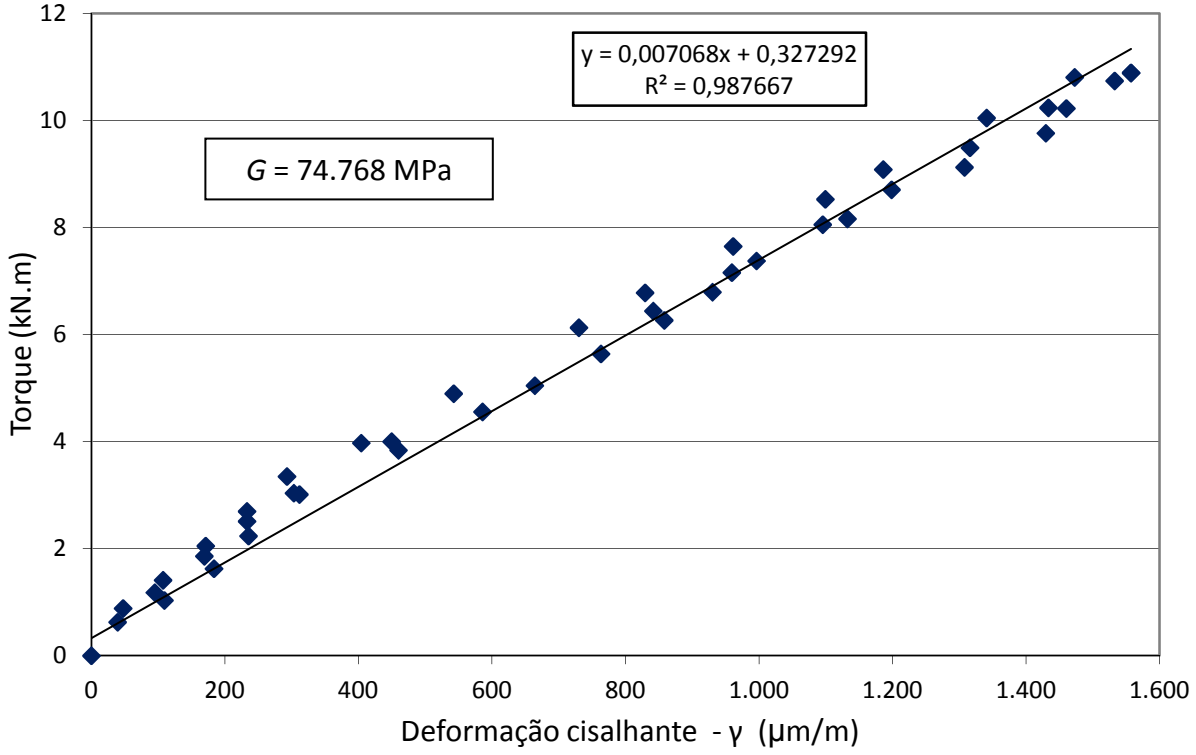


Figura 3.23: Calibração – Seção S1: Torque.

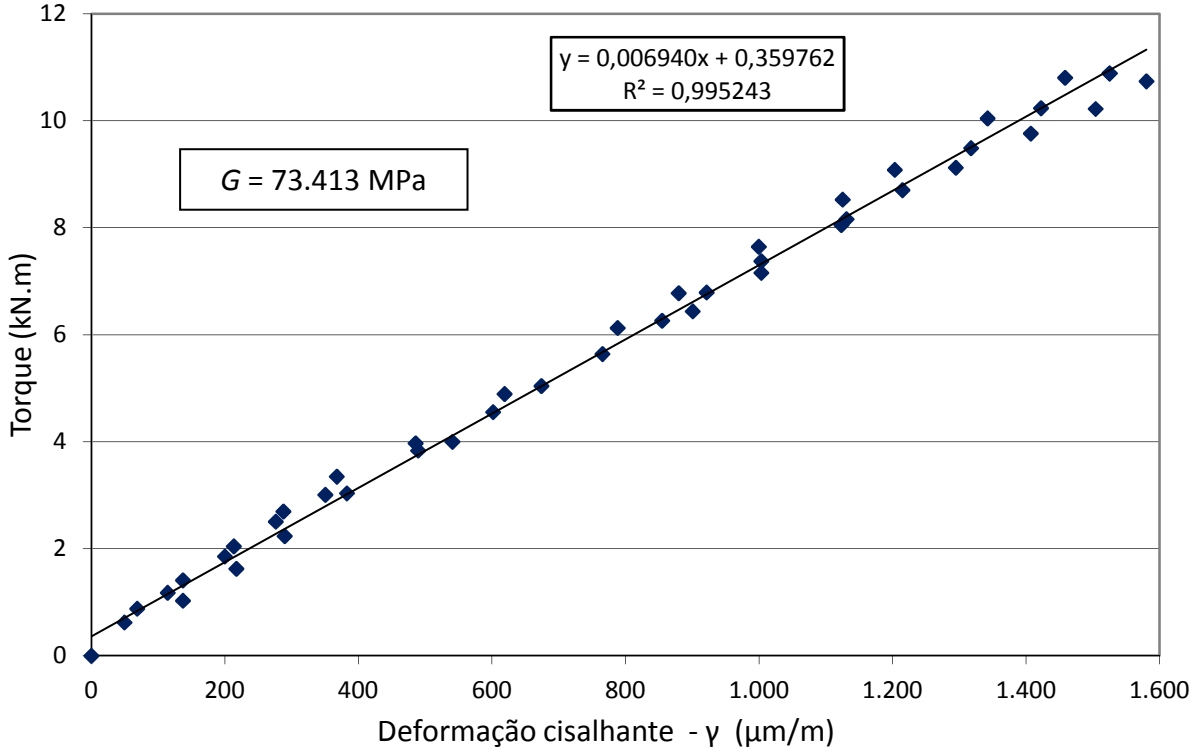


Figura 3.24: Calibração – Seção S2: Torque.

3.2.1.3. Instalação

A instalação da estaca no local dos ensaios foi feita na vertical, distante 1,5 m da sondagem mais próxima. A instalação da estaca IN1 iniciou-se no fundo de uma escavação de 1,0 m. As cotas de parada da ponta da estaca IN1 e IN2 foram de 15,0 m e 12,5 m, em relação à superfície do terreno, respectivamente. A Figura 3.26 e a Figura 3.27 indicam as posições da estaca nos perfis de sondagem, a composição final da estaca em cada local de instalação e a posição de cada seção instrumentada.

Os cabos da instrumentação foram conduzidos pelo interior dos tubos de extensão. Durante a instalação de cada seção de extensão, os cabos foram retirados do interior da estaca por um dos furos da ligação. Os dois furos restantes foram utilizados para inserção dos pinos que faziam a ligação da estaca com o sistema de instalação. A Figura 3.25 apresenta uma vista geral de um tudo de extensão com os cabos pelo seu interior e um detalhe da passagem pelo furo da ligação.

(a) (b)

Figura 3.25: Condução dos cabos da instrumentação (a) vista geral (b) detalhe dos cabos no furo.

3.2.2. Caracterização geológico-geotécnica da Área 2

De acordo com a Companhia Mineradora de Minas Gerais (COMIG, 1994), a região onde foram realizados os ensaios está geologicamente inserida no Complexo Belo Horizonte, que é predominantemente constituído por rochas ácidas dos tipos: granitóides, migmatitos e gnaisses.

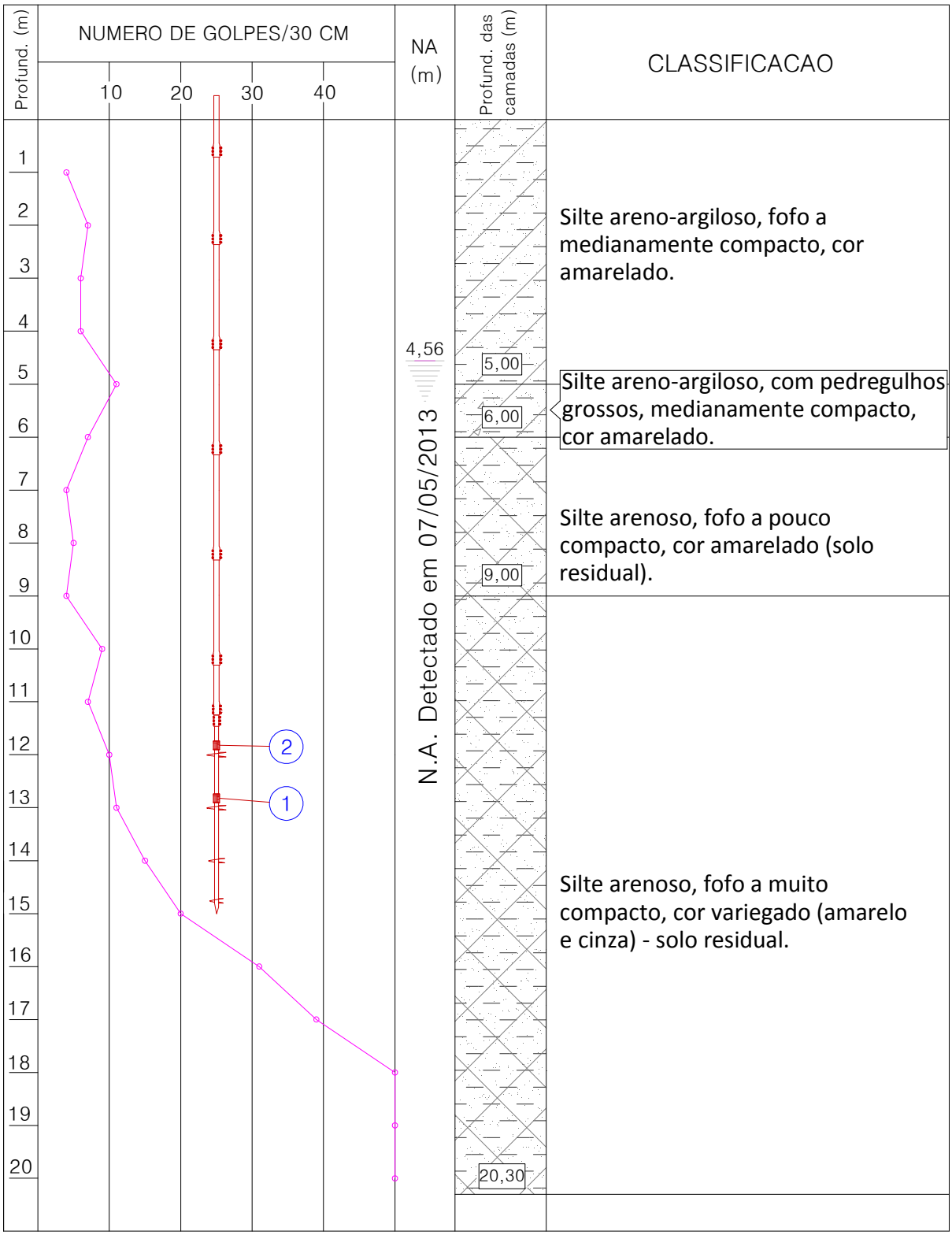


Figura 3.26: Perfil SP-01 e indicação da posição da estaca teste (IN1) e seções instrumentadas no perfil.

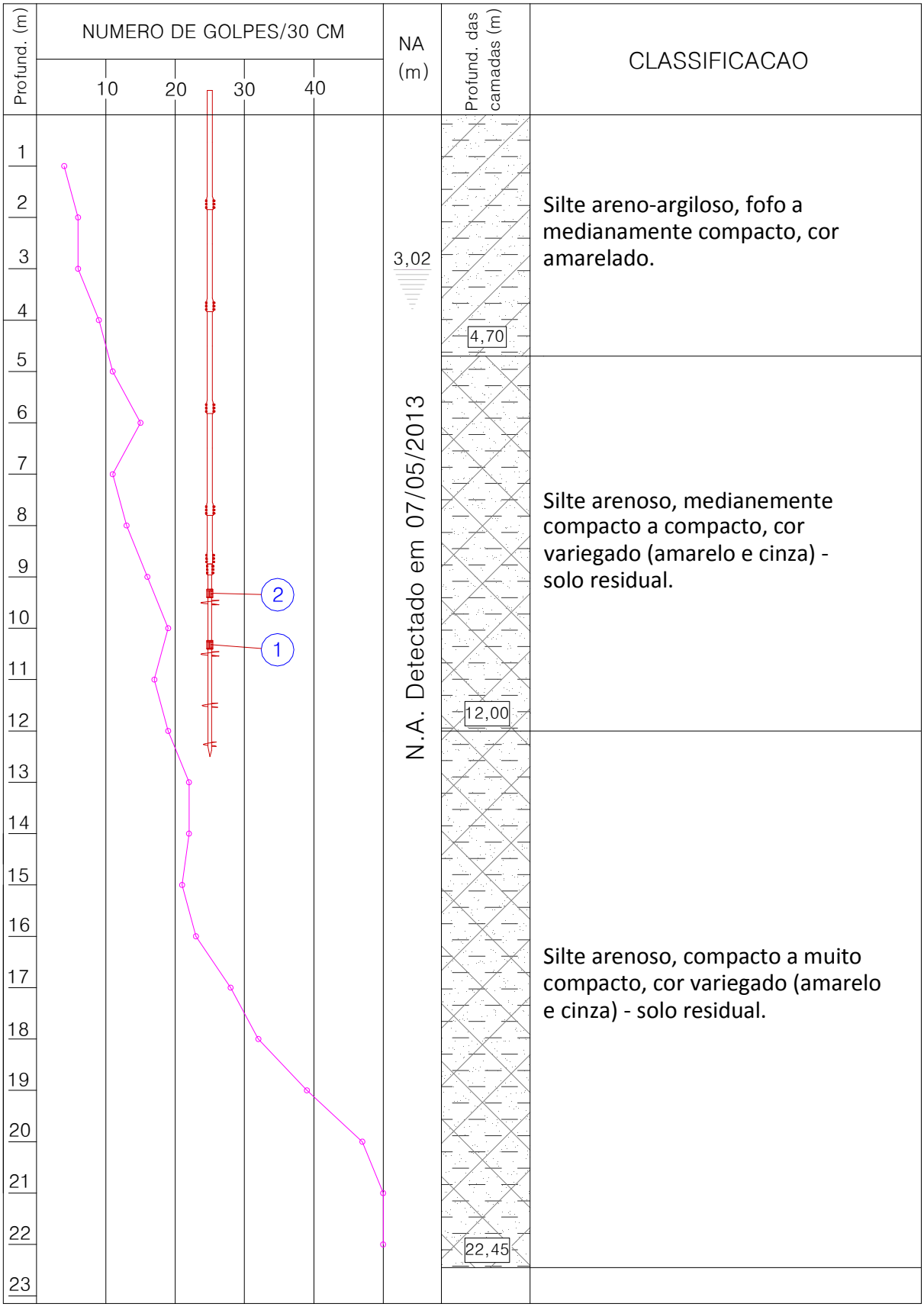


Figura 3.27: Perfil SP-02 e indicação da posição da estaca teste (IN2) e seções instrumentadas no perfil.

3.2.3. Montagem das provas de carga

As provas de carga realizadas foram do tipo rápidas, de acordo com a NBR 12131 (2006). O carregamento foi aplicado em estágios, sendo realizadas leituras dos deslocamentos da cabeça da estaca a cada cinco minutos, independentemente da ocorrência de estabilização. O sistema de reação consistiu-se de uma viga metálica de 5,0 m de comprimento composta por dois perfis I apoiada em fogueiras de dormentes de 1,0 m. O carregamento foi introduzido por macaco hidráulico vazado conectado a bomba manual. Foram utilizados, para leituras do deslocamento, relógios comparadores de 50 x 0,01 mm e para aferição do carregamento aplicado, célula de carga de 500 kN com resolução de 1kN. Foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo P3 da Vishay Precision Group, para leitura a gravação dos sinais da célula de carga e da instrumentação da estaca. A Figura 3.28 apresenta a montagem típica das provas de carga realizadas.

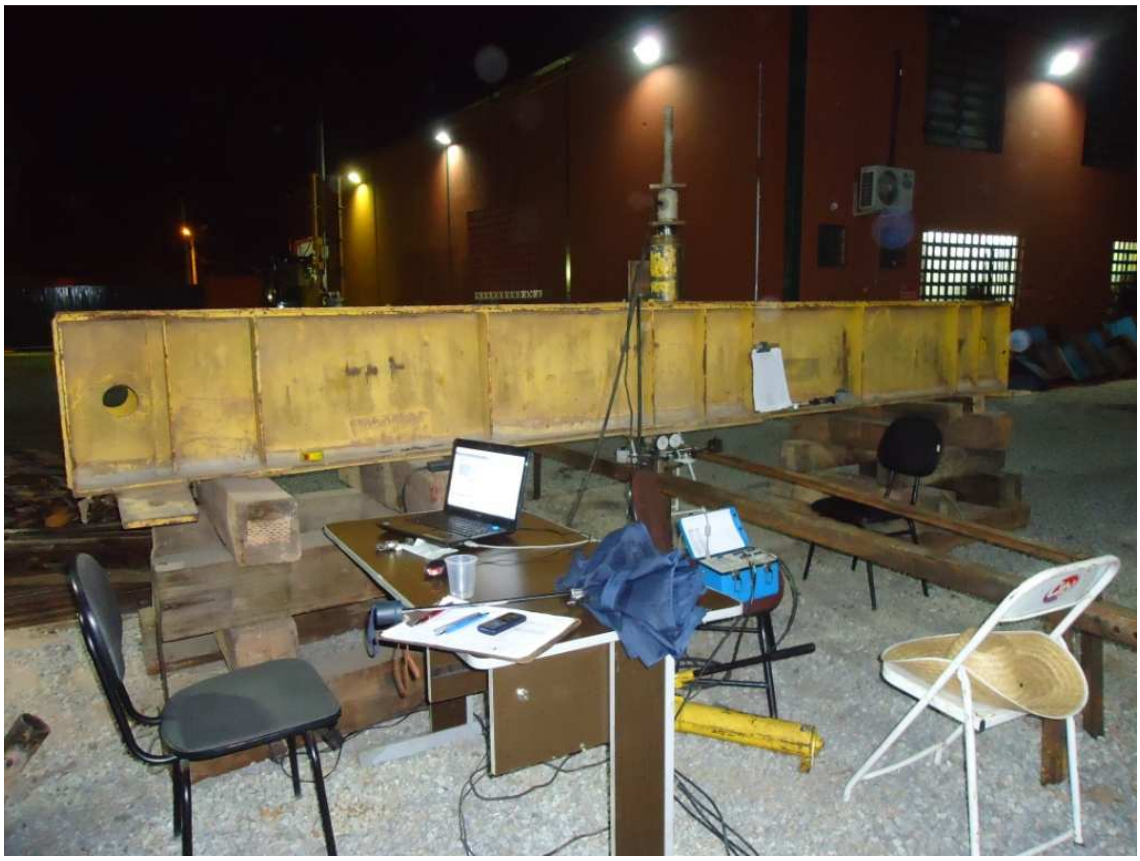


Figura 3.28: Montagem típica das provas de carga.

3.2.4. Estaca com guia e extensões de igual diâmetro e com guia de diâmetro reduzido

Além das hélices, o tubo que constitui a seção guia também é responsável pela perturbação causada ao solo durante a instalação. Para avaliar a influência da haste da seção guia no comportamento da estaca, realizou-se a instalação e prova de carga em uma estaca com tubo da seção guia de diâmetro igual ao das extensões (denominada NIN) próxima à sondagem SP-01, denominada NIN (Figura 3.9).

A estaca na qual foi realizado o ensaio NIN foi composta por uma seção guia de haste tubular com quatro hélices circulares (Figura 3.29). As dimensões das hélices foram as mesmas da estaca instrumentada (ver item 3.2.1), sendo que a guia e as extensões foram fabricadas em tubo de 101,6 mm de diâmetro externo. Ressalta-se que como esta prova de carga não foi instrumentada, não foi necessário seccionar a seção guia para calibração. A instalação foi paralisada com a ponta da estaca a 15,0 m de profundidade para possibilitar uma comparação direta com a estaca instrumentada IN1, ensaiada no mesmo local. As leituras do torque de instalação foram feitas a cada 0,5 m.

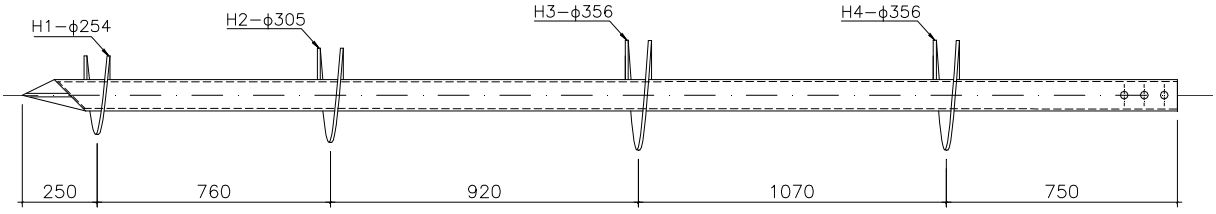


Figura 3.29: Seção guia da estaca com guia e extensões de mesmo diâmetro: Ensaio NIN (Medidas em milímetros).

3.2.5. Injeção de material de preenchimento para observação de solo perturbado pela instalação

Partindo do principio de que um fluido injetado no solo sempre procurará o caminho menos resistente (mais fácil de penetrar), fez-se a instalação de uma estaca com o intuito de verificar se ocorrem vazios ou regiões de solo enfraquecido e sua localização. Estas regiões são oriundas da passagem das hélices durante a instalação da estaca. Decidiu-se utilizar calda de cimento como fluido de injeção, pois, no momento da injeção este material

apresenta-se fluido o suficiente para penetrar nos espaços e após seu endurecimento, permite que o formato final seja observado.

Como a calda de cimento endurecida é de certa forma frágil, a observação do resultado da injeção tem que ser feita *in loco*. Caso a estaca fosse completamente arrancada nenhuma observação seria possível. Desta forma, um poço de inspeção teve que ser escavado e para isso foi necessário que a estaca fosse instalada em solo coesivo e não saturado. Em caso de solo não coesivo e/ou saturado seria inviável escavar o poço, e assim, a observação não seria possível.

A injeção foi feita em uma estaca fabricada pela Vercon Ind. A estaca foi composta por uma seção guia de três hélices (203 – 254 – 305 mm), com haste central e extensões em tubo 73,0 mm, onde foram feitos furos para posterior saída no material injetado (Figura 3.30). A emenda da seção guia com a haste de extensão foi feita através de uma conexão rosqueada, para evitar vazamento de nata por este local. Isto provavelmente ocorreria caso fosse utilizada uma conexão comum, ou seja, ponta e bolsa com parafusos.

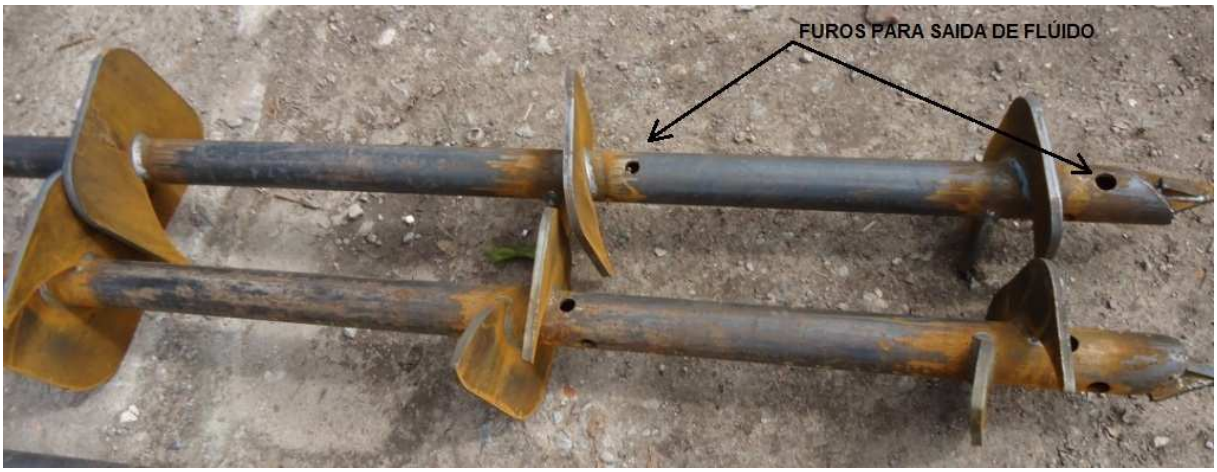


Figura 3.30: Seção guia perfurada para injeção do material de preenchimento.

A estaca foi instalada, na vertical, até 4,0 m de profundidade e a observação foi realizada *in loco*, através de poço de investigação. Esta profundidade de instalação foi definida em compatibilidade com a capacidade da retro-escavadeira disponível para execução do poço e a segurança dos taludes da escavação.

A injeção foi realizada pelo interior da estaca. A calda de cimento utilizada foi produzida em misturador manual com fator A/C (água/cimento) de 0,6, e o sistema de injeção constituiu-

se de pulmão ligado a um ponto de ar-comprimido. O volume de calda injetado foi o correspondente a 150 kg de cimento (tipo CP IV 32), na proporção indicada. A Figura 3.31 apresenta o pulmão e o misturador utilizados.

Figura 3.31: Equipamentos utilizados na produção e injeção do material de preenchimento.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta pesquisa, para a avaliação do efeito de instalação de estacas helicoidais no solo e na capacidade de carga à tração, foram realizados diferentes tipos de experimentos. Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios descritos no capitulo 3. Os resultados mostrados são divididos em ensaios de campo (item 4.1 e 4.2) e ensaios de laboratório (item 4.3).

Os ensaios de campo correspondem a provas de carga (instrumentadas e não instrumentadas) realizadas na Área 1 e na Área 2, instalações instrumentadas e a injeção de fluido em uma estaca, ambos realizados na Área 2. Os ensaios de laboratório correspondem aos ensaios triaxiais e de caracterização realizados no solo da Área 1.

4.1. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 1

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de capacidade de carga das estacas A1 e A2 ensaiadas a tração por Santos (2013). Os registros de torque de instalação são apresentados em Santos (2013). A carga de última convencionada foi definida como a carga correspondente ao deslocamento de 10% do diâmetro médio das hélices, neste caso 20 mm.

Tabela 4.1: Resultado das provas de carga a tração (Adaptado de Santos, 2013)

Estaca helicoidal	Configuração	Carga última convencionada Tração (kN)
A1	1 hélice ϕ 200 mm – fuste 73 mm	18
A2	2 hélices ϕ 200 mm – fuste 73 mm	25

Como mencionado anteriormente, na parte metodológica deste trabalho, as estacas foram ensaiadas a tração e posteriormente a compressão. Os ensaios foram realizados no mês de setembro, sendo que os de tração no ano de 2011 e os de compressão no ano de 2012. No entanto, após os ensaios de tração, foi observado um grande vazio sob as hélices (Figura 4.1). Esta observação foi feita na ocasião da escavação do poço de inspeção ao lado da estaca C3, instalada e ensaiada a tração por Santos (2013), para retirada das amostras indeformadas, também objeto de estudo deste trabalho.

De acordo com Trofimenkov e Mariupolskii (1965), em ensaios de tração ou compressão uma região de compactação é formada na superfície de trabalho da placa e uma cavidade cilíndrica é formada do lado oposto. Este vazio pode ser preenchido caso o solo ao redor da placa tenha baixa coesão (como areias) ou a sua consistência permita-o fluir.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga à tração e compressão nas estacas A1 e A2, respectivamente. As cargas e deslocamentos negativos representam a prova de carga à tração. As provas de carga foram paralisadas devido ao expressivo deslocamento observado no último estágio de carregamento. Uma tentativa de incremento de carga, possivelmente, provocaria deslocamentos tais que a manutenção do carregamento seria impossibilitada pelo fim do curso do macaco utilizado.

Figura 4.1: Vazio sob a hélice observado após ensaio de tração.

Na Figura 4.2, descontando-se a parcela de atrito lateral nas hastes de extensão, para o deslocamento de 20 mm (10% do diametro médio) a capacidade de carga da hélice é aproximadamente 8 kN (resistida pelo solo perturbado sobre a hélice) e na compressão, a capacidade de carga da hélice é aproximadamente 40 kN (resistido pelo solo intacto abaixo da hélice).

Neste caso, como ficou um vazio abaixo da hélice após o ensaio de tração, a resistência por atrito lateral na haste foi estimada no ensaio de compressão como a parcela mobilizada anterior à ocorrência de um grande deslocamento da estaca (até a hélice que estava "pendurada" encostar no solo após vencido o atrito nas hastes de extenção).

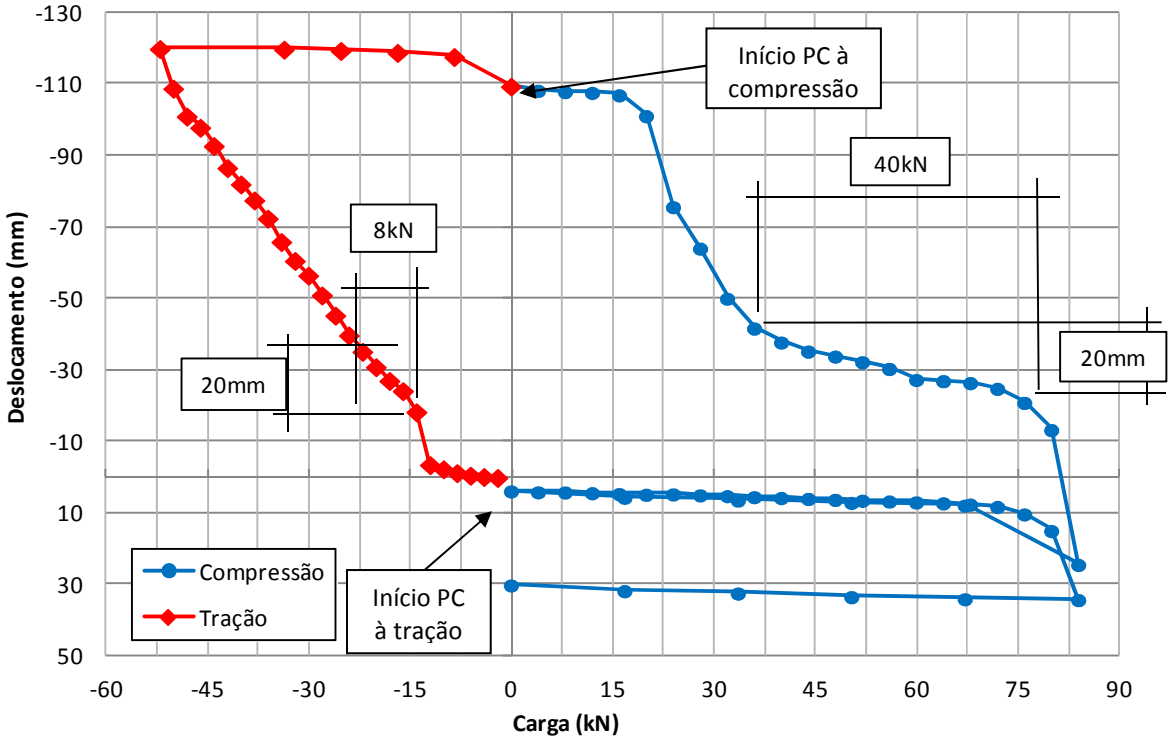


Figura 4.2: Curva carga *versus* deslocamento obtida nas prova de carga à tração e compressão realizadas na estaca A1 (estaca com uma hélice).

Na Figura 4.3 é possível verificar que o comportamento de carregamento e descarregamento da estaca de duas hélices é diferente do observado para a estaca com uma hélice. Além disso, a carga de ruptura convencionada na compressão é mais claramente observada no ensaio da estaca de uma hélice (estaca A1) do que na estaca de duas hélices.

No caso da compressão da estaca A2 (Figura 4.3), o mecanismo de mobilização das parcelas de resistência é mais complexo. Inicialmente, após a mobilização da resistência por atrito lateral (trecho 1), a capacidade de carga da hélice superior, que é colocada sob um solo perturbado pela instalação da estaca, é mobilizada juntamente com a da hélice inferior (trecho 2) e a próxima parte da curva representa a resistência da hélice inferior apoiada no solo intacto (trecho 3). Já na estaca de uma hélice, esta se apóia completamente sobre o solo intacto, e conseqüentemente, a carga de ruptura é mais aparente do que no ensaio da

estaca A2. Desta forma, não foi definida uma capacidade de carga para a estaca A2. A Tabela 4.2 apresenta um resumo da capacidade de carga, somente a contribuição da hélice, da estaca A1.

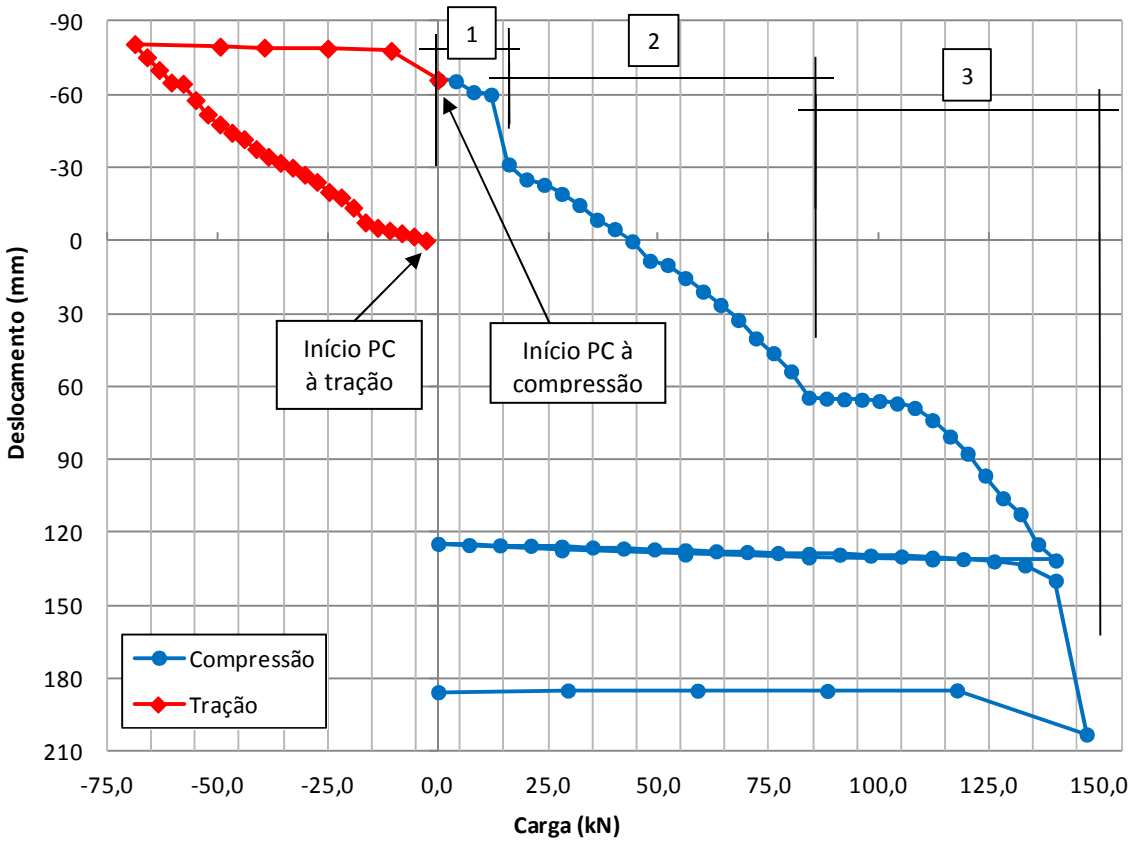


Figura 4.3: Curva carga *versus* deslocamento obtida nas provas de carga à tração e compressão realizadas na estaca A2 (estaca com duas hélices).

Tabela 4.2: Capacidade de carga devido a hélice (tração e compressão) – Estaca A1

Carregamento	Carga última convencionada (kN)	Tensão última mobilizada (kPa)
Tração	8	293,8
Compressão	40	1273,2

Para avaliar o efeito da instalação da estaca na capacidade de carga a tração de estacas helicoidais no solo tropical poroso ensaiado, são comparados os resultados de capacidade carga a tração e compressão, medidos nos ensaios na estaca A1 (uma hélice).

O valor obtido neste trabalho para esta razão onde a estaca foi instalada em solo residual poroso e não saturado é mostrado juntamente com outros valores encontrados na literatura

na Tabela 4.3. Esta tabela mostra que os valores da razão P_{UC}/P_{UT} variam bastante. No entanto, este solo estruturado, poroso e não saturado, e de baixo N_{SPT} (da ordem de 7) é mais sensível às perturbações causadas pela instalação do que os solos sedimentares. Porém, a relação mostrada na Tabela 4.3 deve ser também diminuída de acordo com o aumento do número de hélices da estaca. Para estacas com mais hélices esta razão deve ser menor.

Tabela 4.3: Comparação entre valores de P_{UC}/P_{UT} encontrados na literatura.

Referência	Critério de ruptura/ curva carga *x* recalque	Solo da ponta da estaca	P_{UC}/P_{UT}
Trofimenkov & Mariupolskii (1965)	10%D	Argila mole a rija/ areia fofa a compacta	1,4 a 1,5
Zhang (1999)	10%D	Argila e areia	2
Kanai (2007)	10%D	pedregulhos	1,8
Livneh & El Naggar (2008)	8%D + desloc. elástico	Silte argiloso	1,8 a 2
Livneh & El Naggar (2008)	8%D + desloc. elástico	Areia fina compacta	2,3
Sakr (2009)	10%D	Areia betuminosa	2
Perko (2009)	Carga máxima (pico)	Depósito glacial	1,2
Projeto anterior com estacas ancoradas em solo residual brasileiro	10%D	Areia siltosa (solo residual) N_{SPT}~20	1,3
Este trabalho	**10%D**	**Silte areno-argiloso (solo residual) N_{SPT}~7**	**5**

Pelos resultados na estaca A1, a capacidade de carga solo intacto (ensaio de compressão) pode ser comparada diretamente com a do solo perturbado (ensaio de tração), verificou-se que a perda da resistência neste tipo de solo residual não saturado de elevada porosidade é muito significante em comparação com a resistência deste tipo de solo quando intacto.

Sendo assim, estes resultados indicam que deve-se evitar ancorar estacas helicoidais neste tipo de solo poroso.

4.2. PROVAS DE CARGA INSTRUMENTADAS REALIZADAS NA ÁREA 2

Os registros de torque de instalação da estaca helicoidal instrumentada (ensaios IN1 e IN2), instalada e ensaiada na Área 2 em Betim/MG, medidos a cada 0,25 m, em relação à penetração da ponta da estaca, são graficamente apresentados na Figura 4.4.

O controle da profundidade de instalação foi realizado através de marcações feitas com giz ao longo da estaca. As dimensões da estaca e posicionamento das seções instrumentadas estão descritas na Figura 3.10, Figura 3.26 e na Figura 3.27 do Capítulo 3.

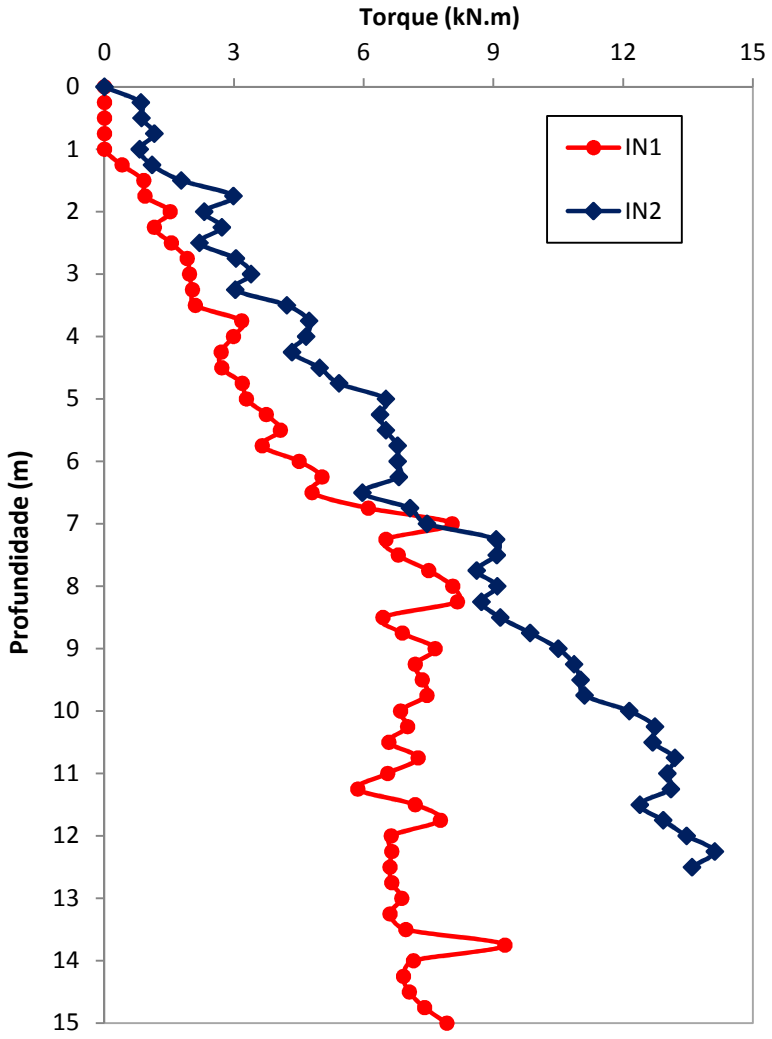


Figura 4.4: Curvas torque de instalação *versus* profundidade da ponta da estaca para as instalações IN1 e IN2.

A Figura 4.5 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga à tração instrumentadas IN1 e IN2. Os resultados indicam que as cargas últimas convencionadas da estaca para as instalações IN1 e IN2 foram, 116 kN e 142 kN,

respectivamente. As cargas últimas convencionadas foram definidas como a carga correspondente a um deslocamento de 10% do diâmetro médio das hélices, neste caso 31,8 mm. A geometria da estaca está apresentada na Figura 3.10. As provas de carga foram levadas até um carregamento máximo de 240 kN e 300 kN, para os ensaios IN1 e IN2, respectivamente.

Em provas de carga à tração em estacas helicoidais, devido as folgas necessárias a montagem das peças de aplicação de carga, ocorre um considerável deslocamento com uma pequena carga aplicada. Como ele não se apresenta constante em todas as estacas, não é considerado como parte do deslocamento da estaca. Desta forma, o primeiro estágio de carregamento é considerado como uma carga de ajuste.

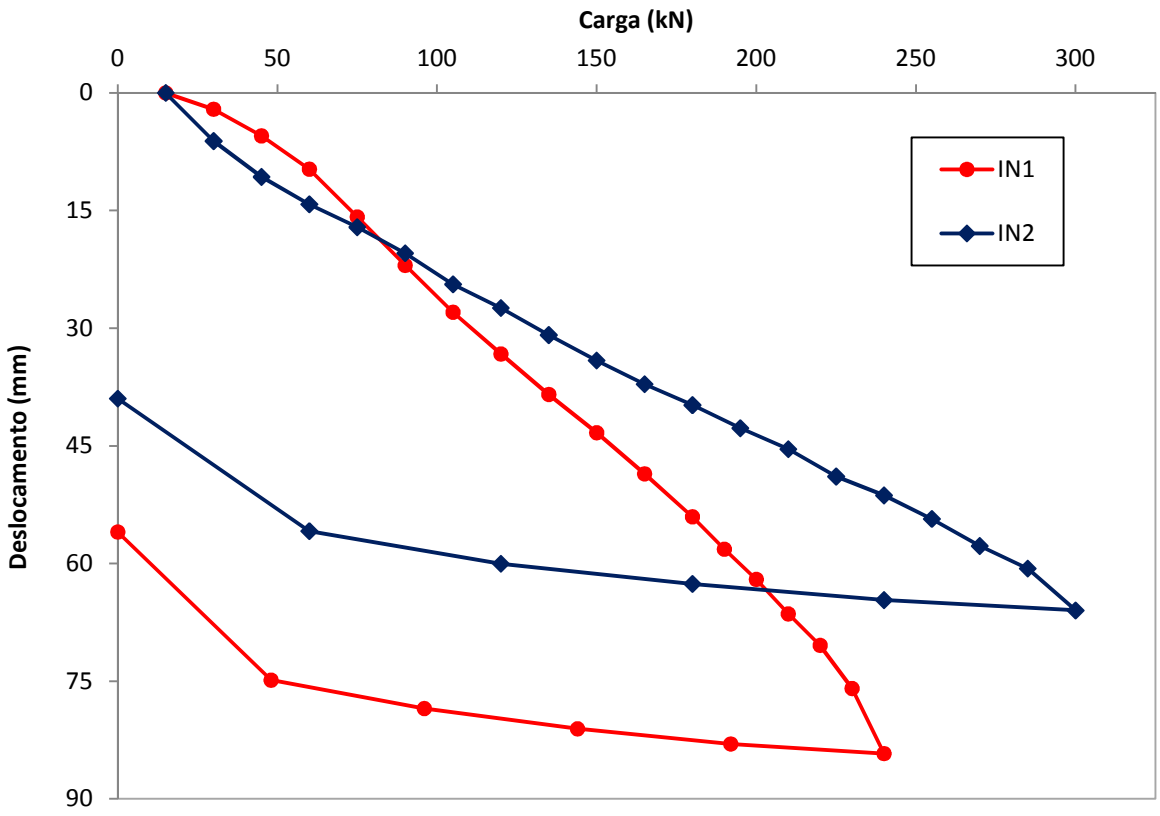


Figura 4.5: Curvas carga total de tração *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga instrumentadas IN1 e IN2.

Observa-se que a estaca IN2 apresenta maior capacidade de carga. Isto se deve ao fato da instalação ter sido realizada de forma que as hélices da estaca se encontrassem em solo mais competente que a estaca IN1.

4.2.1. Medida do torque de instalação em profundidade

Foram tomadas leituras a cada 0,25 m do torque total de instalação, indicado no torquímetro do equipamento de instalação, e do tempo corrido. A resposta da instrumentação foi obtida por sistema de aquisição de dados a uma taxa de um ponto por segundo. Posteriormente, procedeu-se a sincronização e tratamento estatístico das medidas realizadas.

Os dados obtidos durante as instalações instrumentadas são graficamente apresentados na Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente. São apresentados no gráfico os torques representativos de:

Total: é o torque aplicado pelo motor hidráulico do equipamento de instalação na cabeça da composição, lido no torquímetro da máquina.

Fuste: é a parcela do torque resistida pelas hastes de extensão. Determinado pela subtração do torque total pelo torque na seção S2, obtido pela instrumentação.

H1+H2+H3: é a parcela do torque necessário para a penetração das hélices H1, H2, H3 e trechos de haste da ponta da estaca até a hélice H3. Obtido pela instrumentação da seção S1.

H4: é a parcela do torque necessário para a penetração da hélice H4 (superior) e trecho de haste entre as hélices H3 e H4. Determinado pela subtração do torque na seção S2 pelo registrado na seção S1. Obtidos pela instrumentação.

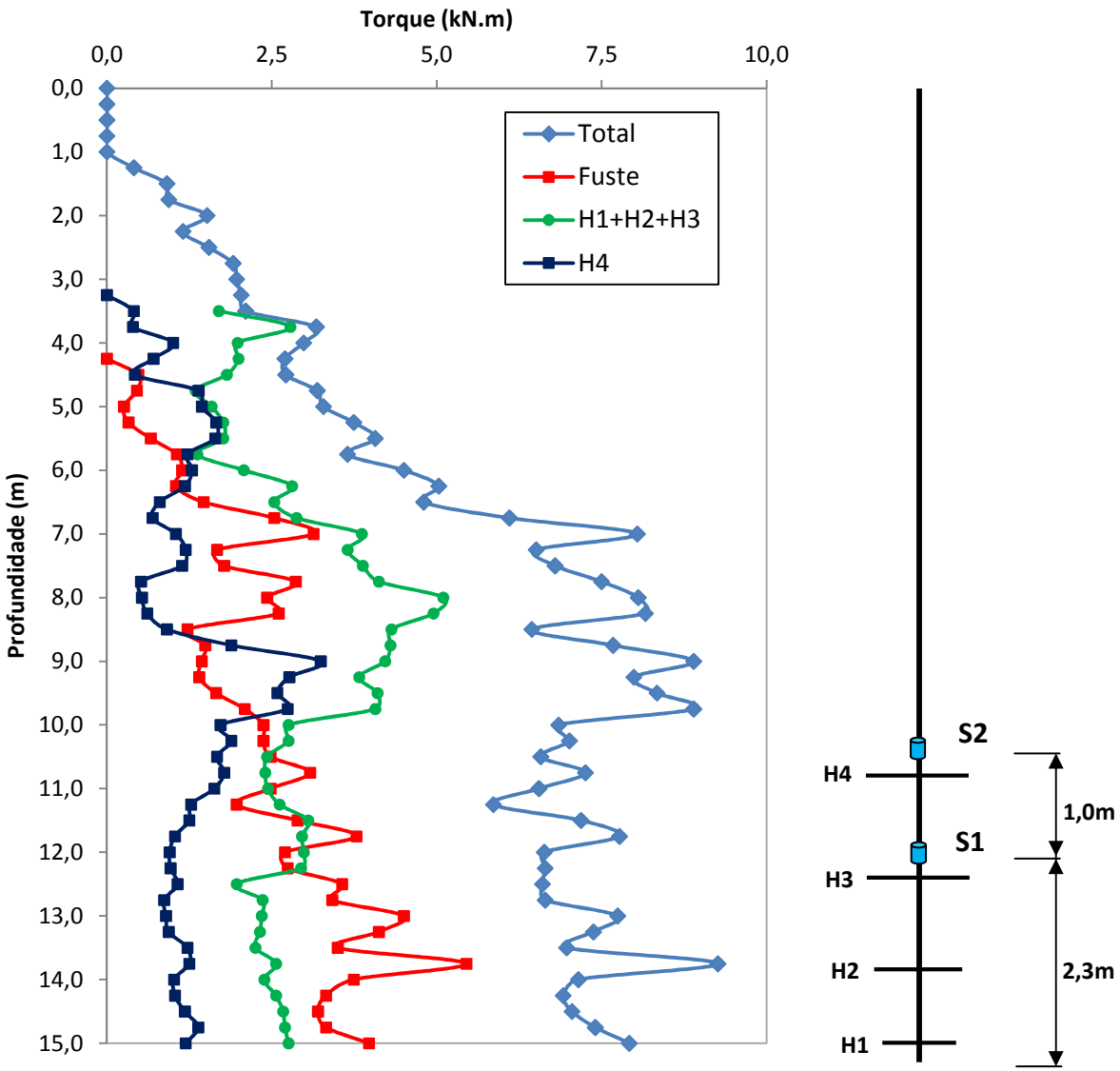


Figura 4.6: Curvas torque *versus* profundidade da ponta estaca obtidas pela instrumentação. Ensaio IN1.

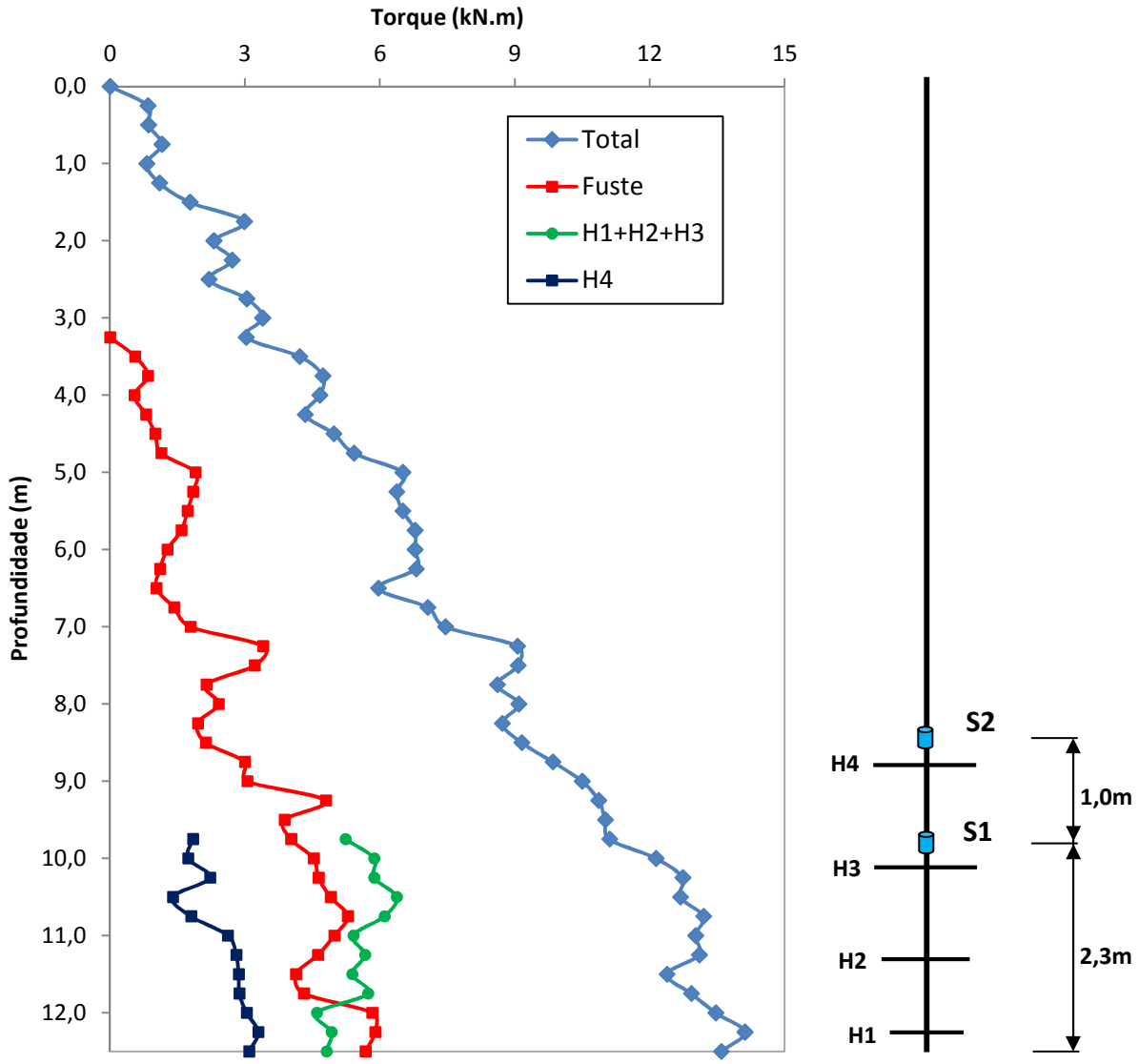


Figura 4.7: Curvas torque *versus* profundidade da ponta estaca obtidas pela instrumentação. Ensaio IN2.

A Tabela 4.4 apresenta os torques obtidos na instalação da estaca instrumentada em cada local de teste. Os valores são a média dos torques no último metro de instalação. O torque "Guia" representa a parcela de torque necessário para penetração da seção guia, obtido pela instrumentação da seção S2.

Tabela 4.4: Torques finais de instalação (em kN.m), total e parcelas obtidas pela instrumentação.

Ensaio	Total	H1+H2+H3	H4	Guia	Fuste
IN1	7,29	2,61	1,16	3,77	3,52
IN2	13,29	5,22	3,03	8,12	5,17

Na Tabela 4.4, nota-se que a seção Guia é responsável pela maior parcela do torque de instalação. O torque necessário a instalação da hélice H4 representa 34%, em média, do torque necessário para instalação da seção guia. O torque Fuste representa parcela significativa do torque total de instalação.

4.2.2. Diagramas de transferência de carga

A partir dos dados obtidos pela instrumentação foi possível montar os diagramas de transferência de carga apresentados na Figura 4.8 e Figura 4.9. A resposta da instrumentação foi obtida por sistema de aquisição de dados a uma taxa de um ponto a cada dez segundos. Posteriormente, procedeu-se a sincronização e tratamento estatístico das medidas realizadas.

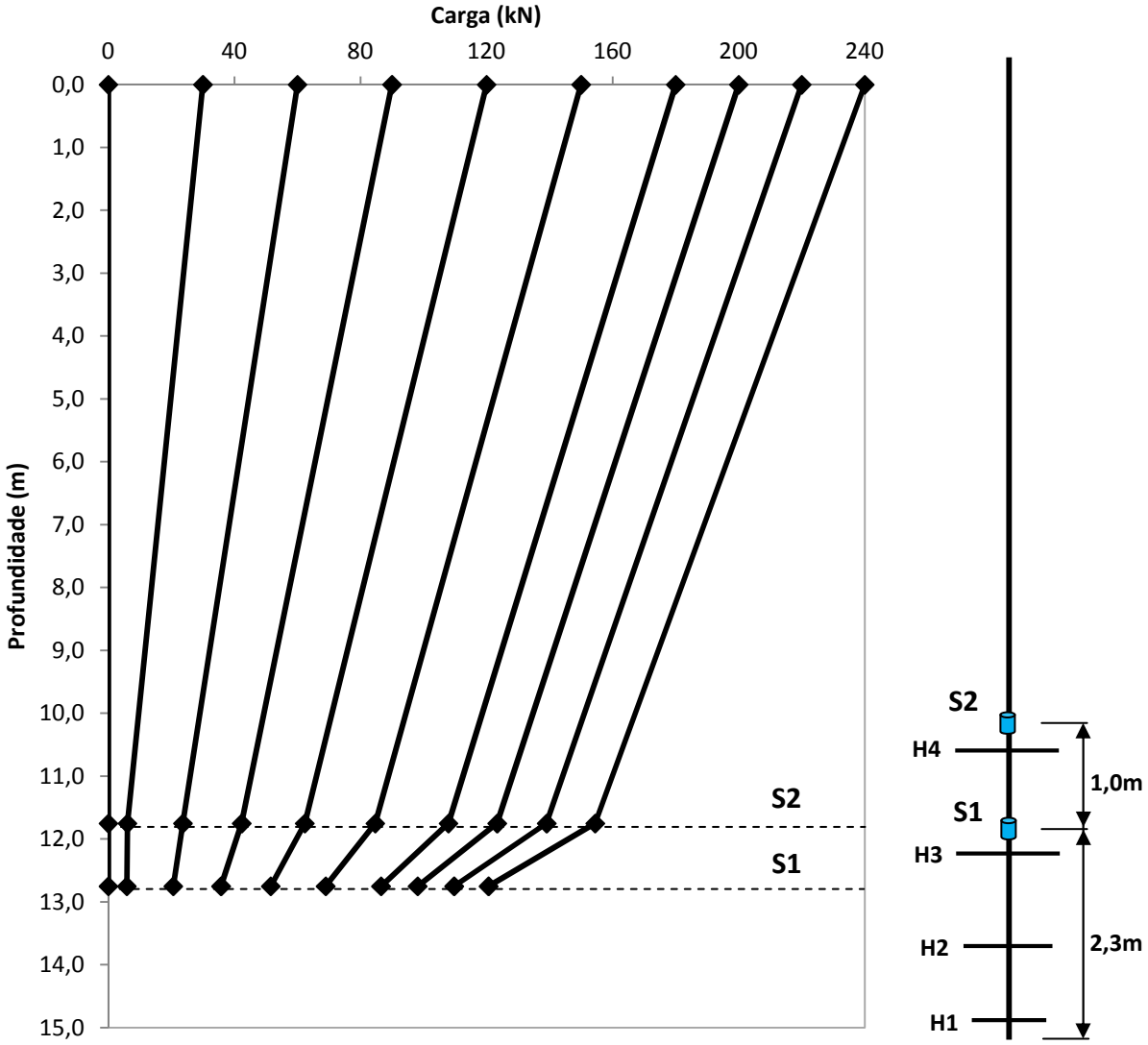


Figura 4.8: Diagrama de transferência de carga para a instalação em SP-01.

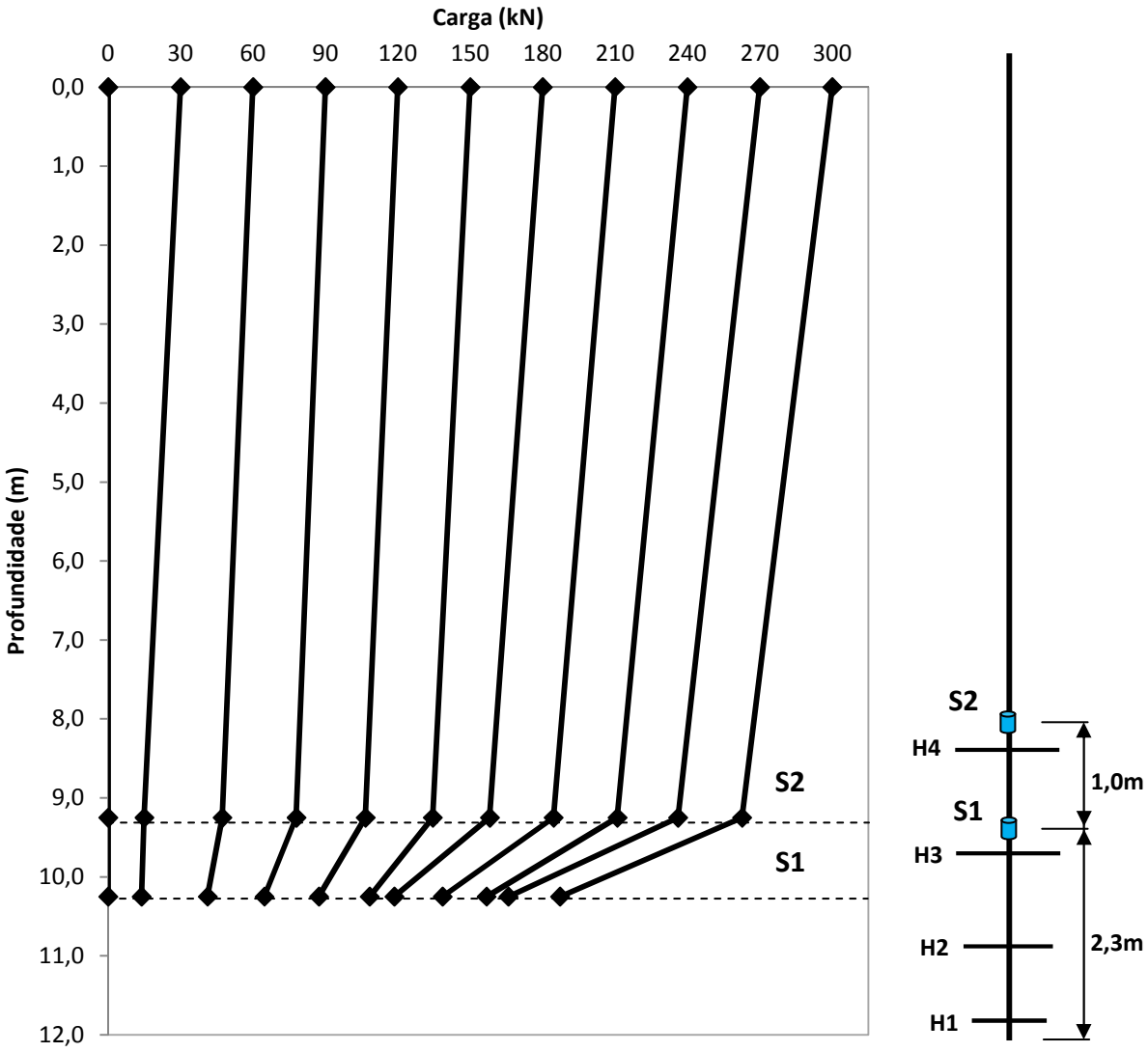


Figura 4.9: Diagrama de transferência de carga para a instalação em SP-02.

Observa-se que as hélices contribuem com a maior parcela da carga aplicada. No entanto a parcela de carga devido ao atrito lateral nas extensões apresentou uma contribuição significativa na capacidade de carga, principalmente na instalação em SP-01. Isto pode ter ocorrido devido ao tubo da seção guia ter diâmetro menor que o dos tubos de extensão.

Nos deslocamentos iniciais, a carga é quase que em sua totalidade suportada pelas hélices mais próximas a ponta da estaca, isso indica que a rigidez do solo entre as hélices diminui à medida que é cortado por elas durante a instalação da estaca. Nos deslocamentos finais, ocorre uma melhoria nas propriedades do solo, fazendo com que todas as hélices trabalhem de maneira similar.

As cargas últimas convencionadas foram definidas como a carga que provoca um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio, neste caso, 31,8 mm. Na Tabela 4.5 são apresentas as cargas últimas convencionadas da estaca instrumentada em cada um dos ensaios realizados, onde:

Total: é a carga total aplicada na cabeça da composição, lido por célula de carga.

H1+H2+H3: é a parcela da carga correspondente as hélices H1, H2 e H3. Obtido pela instrumentação instalada na seção S1.

H4: é a parcela da carga correspondente a hélice H4. Determinado pela subtração da carga na seção S2 pela na seção S1.

Guia: parcela de carga correspondente a seção guia. Obtida pela instrumentação na seção S2.

Fuste: é a parcela da carga resistida por atrito lateral nas hastes de extensão. Determinada pela subtração da carga total pela carga na seção S2, obtida pela instrumentação.

Tabela 4.5: Cargas últimas convencionadas da estaca (em kN) e parcelas obtidas pela instrumentação.

Ensaio	Total	H1+H2+H3	H4	Guia	Fuste
IN1	116	49	10	59	57
IN2	142	103	25	128	14

4.2.2.1. Desenvolvimento do atrito lateral

Através da instrumentação implantada na seção S2 foi possível obter a distribuição de tensão de atrito lateral nas hastes de extensão da estaca nos dois testes realizados (Figura 4.10). Para determinação da área lateral considerou-se, além do diâmetro externo do tubo, o comprimento efetivo L_{eff}, que é o comprimento de haste de extensão acima da hélice do topo até a superfície do terreno subtraído do diâmetro da hélice do topo (ZHANG, 1999). A Tabela 4.6 apresenta a geometria considerada para o cálculo da tensão de atrito lateral desenvolvida ao longo das extensões da estaca nos ensaios IN1 e IN2. Os valores da tensão de atrito lateral no deslocamento correspondente a ruptura convencionada foram extrapolados através de interpolação linear.

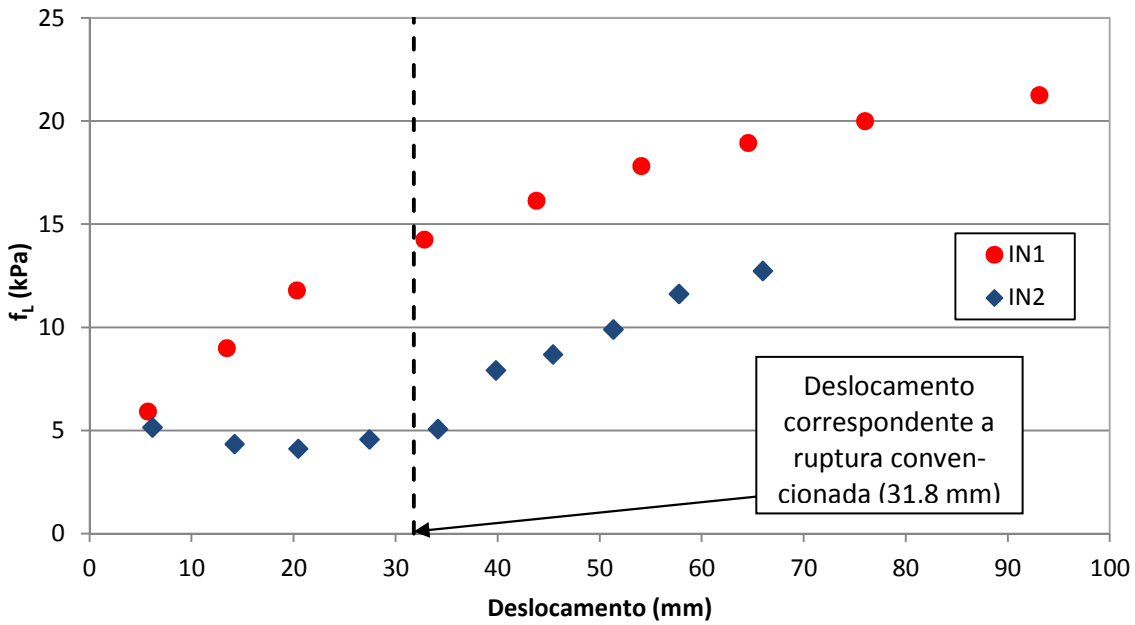


Figura 4.10: Diagrama de atrito lateral nos ensaios IN1 e IN2.

Observa-se que a tensão de atrito lateral desenvolvida no deslocamento convencionado como ruptura (10%D) no ensaio IN1 é 2,8 vezes superior à desenvolvida no ensaio IN2. A figura 4.10 mostra que a maior parte da resistência por atrito na IN2 começou a ser mobilizada mais tarde (com maiores deslocamentos) em relação ao caso da IN1. No caso da IN2 as hélices estavam instaladas em solo de maior capacidade, portanto, nos primeiros deslocamentos as hélices "pegaram" mais carga do que a haste. Além disso, como após a instalação da estaca helicoidal no terreno a parcela da haste próxima à superfície tem pouco contato com o solo envolvente, o cálculo da área de contato de ambas as estacas pode não corresponder à realidade. Nota-se também que não ocorreu saturação do atrito em nenhum dos ensaios, mas há uma tendência de estabilização do crescimento, nos maiores deslocamentos.

Tabela 4.6: Geometria e tensão de atrito obtidas nos testes IN1 e IN2.

Ensaio	Geometria	Tensão de atrito lateral no deslocamento correspondente a ruptura convencionada (kPa)
IN1	ϕ=101,6 mm e L_{eff}=12,4 m (A = 3,96 m²)	13,9
IN2	ϕ=101,6 mm e L_{eff}=8,9 m (A = 2,84 m²)	4,9

4.2.3. Valores do fator de torque (K_t) das estacas instrumentadas

A Tabela 4.7 apresenta os fatores de torque obtidos. Este fator é representa a razão entre capacidade de carga e o torque final de instalação da estaca. Os fatores de torque apresentados foram determinados para algumas partes da estaca, e correspondem à parcela da capacidade de carga relativa a esta parte dividida pelo correspondente torque mobilizado durante a instalação. Os torques e cargas foram apresentados na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5, respectivamente. O fator de torque é utilizado nos projetos e no controle de execução de estacas helicoidais. Na literatura, os fatores de torque são comumente apresentados como função do diâmetro do tubo da seção guia.

Tabela 4.7: Fatores de torque (K_t), em m^{-1}.

Ensaio	Total	H1+H2+H3	H4	Guia	Fuste
IN1	15,9	18,8	8,6	15,6	16,2
IN2	10,7	19,7	8,2	15,5	2,7

Na Tabela 4.7 observa-se:

1. Os fatores K_t - Total obtidos para a estaca em cada local que instalação são consideravelmente inferiores, da ordem da metade, dos valores encontrados na literatura. Cita-se como exemplo, Hoyt e Clemence (1989), AC 358 (ICC-ES, 2007) e Perko (2009), que apresentam os valores (em m^{-1}): 33, 30 e 26, respectivamente, para estacas de com haste de 73,0 mm de diâmetro. Este fator representa a razão entre a resistência do solo perturbado (medida no carregamento) pela resistência do solo intacto atravessado durante a instalação (medida pelo torque de instalação). Os valores de K_t sugeridos na literatura representam principalmente solos de clima temperado e sedimentares. No caso presente, os valores da Tabela 4.7 mostram que os solos tropicais são mais influenciados pela instalação da estaca.

2. Os fatores K_t - H1+H2+H3, K_t - H4 e K_t - Guia obtidos para as duas estacas são praticamente iguais. Desta forma, para as condições geotécnicas do local de teste (silte arenoso residual abaixo do nível d'água), pode-se dizer que a resistência inicial do solo não afeta significativamente o fator de torque, pois, nos dois locais a instalação a seção guia da estaca foi paralisada em solo com N_{SPT} significativamente diferentes.

3. O fator K_t - H1+H2+H3 é 130% superior ao K_t - H4, considerando as médias dos valores obtidos nos dois ensaios realizados. Isto indica que a capacidade de carga de cada hélice é influenciada pelo número de vezes que o solo acima dela foi cortado pelas hélices da estaca.

4. O K_t - Fuste obtido no ensaio IN1 foi consideravelmente superior (6 vezes maior) ao obtido no ensaio IN2. Isto ocorreu devido ao fato do torque "Fuste" do ensaio IN2 ter sido superior ao do ensaio IN1, ao passo que, o contrário ocorreu com a carga, ou seja, a carga "Fuste" do ensaio IN1 foi superior a do ensaio IN2.

Estes resultados indicam que, aparentemente, cada hélice apresenta um fator K_t diferente e este valor é progressivamente reduzido, em relação à posição da hélice na estaca. Ou seja, o fator K_t da primeira hélice é maior que o da segunda, que por sua vez é maior que o da terceira, e assim sucessivamente. Então, devido a esta perda progressiva de resistência, quanto mais hélices houver na estaca, menor será o fator K_t das últimas hélices e, conseqüentemente, da própria estaca. Portanto o K_t não é uma função apenas do diâmetro da haste da seção guia, como é comumente apresentado na literatura técnica, mas também depende do efeito da instalação no solo acima das hélices.

Desta maneira, tem-se que as hélices superiores contribuem pouco com a capacidade de carga e acabam por reduzir o K_t da estaca. Na prática das estacas helicoidais no Brasil estas observações têm duas implicações práticas:

1. Quando a estaca não atinge a capacidade de carga necessária, por ocorrência de impenetrável antes de verificação do torque de instalação. Na prática, são empregadas extensões com hélices para aumentar o torque necessário a instalação da estaca, na intenção de que o torque final mínimo seja atingido com profundidade menor que a do impenetrável. Desde que o embutimento mínimo seja respeitado, é claro. Porém, o ganho de capacidade de carga neste caso não é proporcional ao aumento do torque de instalação.

2. Em perfis de alteração profundos, a fim de diminuir o comprimento instalado das estacas, é prática aumentar o número de hélices utilizando extensões com hélices. Este procedimento faz com que o torque final de instalação, definido em projeto, seja atingido em profundidades menores. Mas, pelos motivos já apresentados, provavelmente, não será suficiente para que se verifique a capacidade de carga necessária.

4.2.4. Estaca com guia e extensões de igual diâmetro e com guia de diâmetro reduzido

Os torques de instalação das estacas dos ensaios IN1 e NIN são graficamente apresentados na Figura 4.11. Os torques foram medidos a cada 0,25 m (IN1) e 0,50 m (NIN), de penetração da ponta da estaca. O controle da profundidade de instalação foi realizado através de marcações feitas com giz ao longo da estaca.

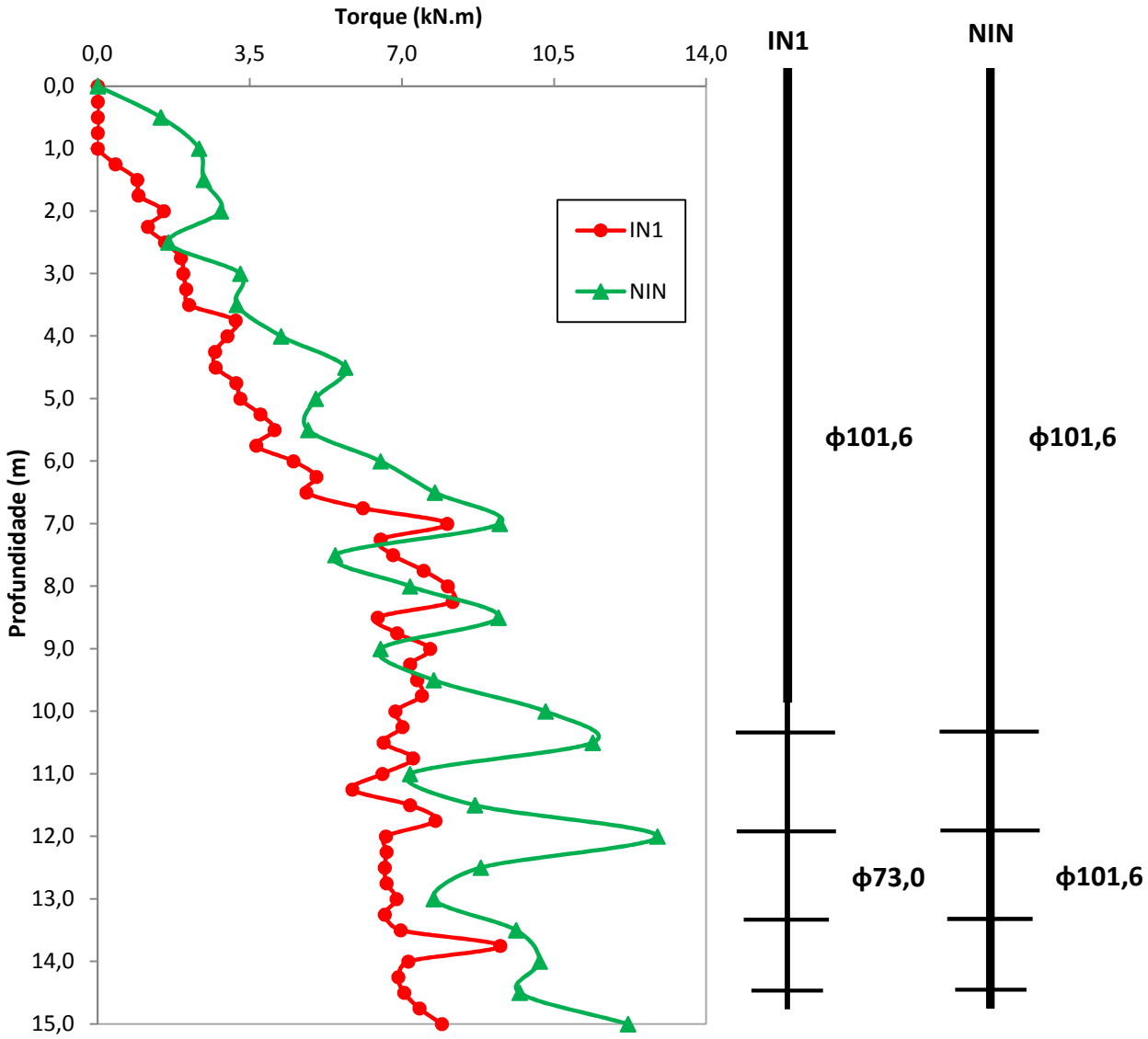


Figura 4.11: Torque de instalação das estacas com guia e extensões de 101,6 mm (NIN) e da estaca com guia reduzida, de 73,0 mm (IN1).

A Figura 4.12 apresenta as curvas carga versus deslocamento obtidas nas provas de carga realizadas nas estacas com guia e extensões de mesmo diâmetro e com guia de diâmetro reduzido em relação a das extensões. As cargas últimas convencionadas foram definidas

como a carga que provoca um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio das hélices, neste caso, 31,8 mm. A

Tabela 4.8 resume os resultados dos ensaios IN1 e NIN. A prova de carga na estaca NIN foi paralisada com carregamento máximo igual ao da estaca IN1.

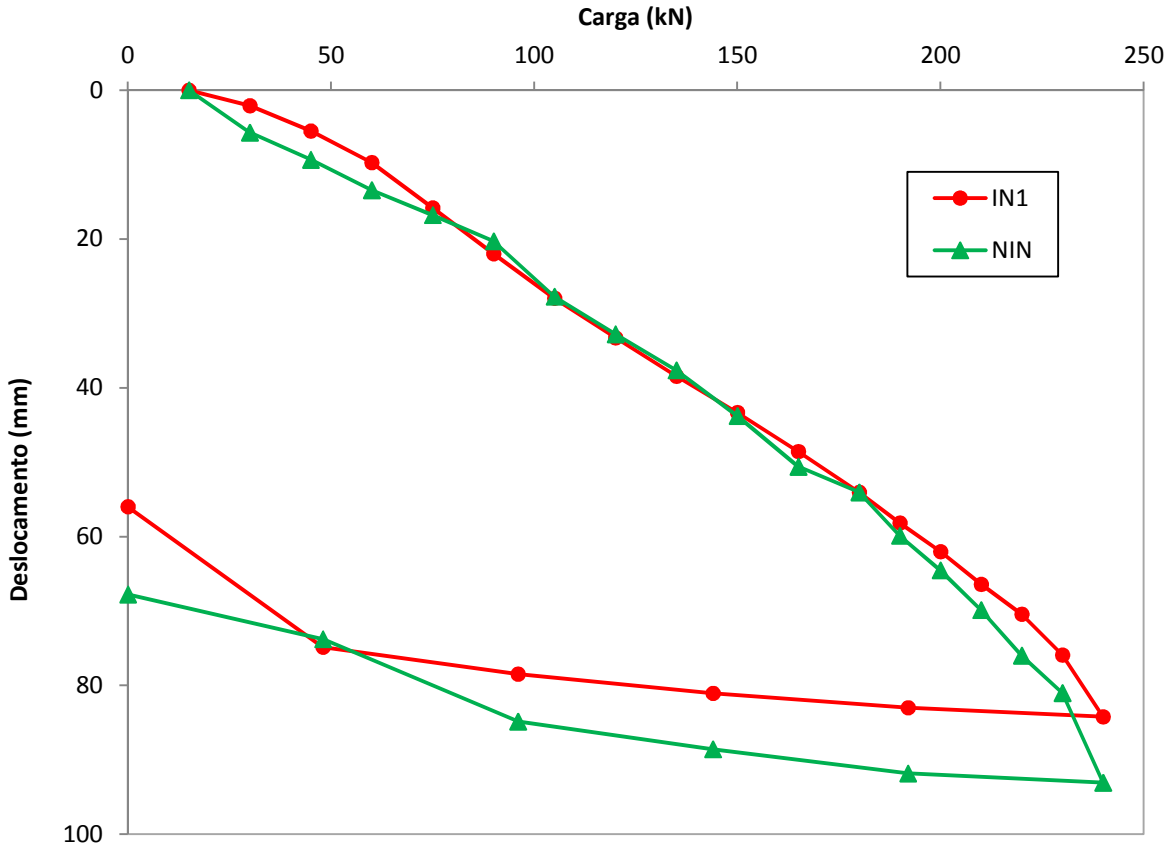


Figura 4.12: Curvas carga versus deslocamento obtidas nas provas de carga a tração realizadas nas estacas com guia e extensões de mesmo diâmetro (NIN) e guia reduzida (IN1).

Tabela 4.8: Resumo dos resultados dos ensaios IN1 e NIN.

Ensaio	Torque de instalação (kN.m)	Carga última convencionada (kN)	K_t (m^{-1})
IN1	7,29	116	15,9
NIN	10,69	116	10,9

Por meio da Figura 4.12 e da Tabela 4.8 pode-se verificar que as estacas apresentaram o mesmo comportamento e a mesma capacidade carga. No entanto, nota-se que:

1. A estaca com guia reduzida apresenta uma parcela de resistência por atrito lateral nas extensões levemente superior ao caso da estaca com guia de maior diâmetro, percebida nos

estágios iniciais da curva (maior rigidez). Com um tubo menor na seção guia, as extensões das estacas instrumentadas acabam sendo instaladas em solo menos perturbado pela passagem da seção guia. Deste modo, penetrando-se primeiramente uma guia de menor diâmetro no solo, ocorreu um ganho na resistência por atrito lateral ao longo das extensões;

2. Após a fase de descarregamento no ensaio, o deslocamento vertical permanente da estaca foi 12 mm maior na estaca com a seção guia de maior diâmetro (56 mm na estaca com guia reduzida e 68 mm na estaca de guia de maior diâmetro). Ou seja, o desempenho da estaca com seção guia reduzida é superior ao da estaca com seção guia de igual diâmetro da extensão;

3. Comparando-se os valores de torque de instalação das duas configurações de estaca (com seção guia reduzida e com guia de diâmetro igual ao da extensão), nota-se que o torque de instalação da estaca com guia de maior diâmetro é 47% superior ao da estaca com guia reduzida. No entanto, como a capacidade de carga das estacas foi a mesma, a estaca com guia reduzida apresenta um fator de torque ($K_t=P_u/T$) superior (menor torque de instalação para mesma capacidade de carga).

Em termos de energia, pode-se entender que o torque aplicado representa a energia necessária para a penetração da estaca helicoidal no solo. Como esta energia não é recuperada, entende-se que seja transferida ao solo e transformada em trabalho de forças não conservativas. Uma das parcelas é a energia necessária ao deslocamento lateral do solo no local onde o fuste estará embutido, outra seria a responsável pelo deslizamento das hélices no solo. Esta energia transferida é responsável pelas modificações das propriedades (perturbação) do solo durante a instalação da estaca, e como já foi identificado nesta pesquisa, e em diversas outras, o solo intacto é mais resistente que o solo atravessado pela estaca. Então, por necessitar de menos torque para instalação, a estaca com guia reduzida perturba menos o solo, visto que os deslocamentos radiais devido à penetração da haste são menores.

Em geral, como mostrado nas provas de carga instrumentadas em Kanai (2007), a contribuição por atrito lateral na haste da estaca é quase nula quando a seção guia e extensões apresentam mesmo diâmetro. O efeito de instalação da estaca não afeta somente a resistência do solo imediatamente acima das hélices, mas também o solo ao longo da

haste, prejudicando a resistência por atrito lateral ao longo de seu comprimento. Logo a utilização de estacas com guia de diâmetro reduzido contribui para um aumento na parcela de atrito lateral de estacas helicoidais.

Ressalta-se ainda que o valor obtido da capacidade de carga da estaca com guia reduzida ainda pode ter sido diminuído pela perturbação causada pela conexão para calibração, entre as hélices H2 e H3.

Esta conexão foi introduzida devido à necessidade de diminuição do comprimento da guia com haste de 73,0 mm (guia reduzida) para calibração da instrumentação nela implantada, cujas finalidades são discutidas no item 3.2.1 deste trabalho. Esta conexão constitui-se de uma ligação tipo ponta e bolsa parafusada.

No momento da instalação, somente se dispunha de parafusos 22,2 x 165,1 mm (7/8” x 6 1/2”) para execução da conexão para calibração. Estes parafusos são excessivamente longos para a conexão. O excesso de comprimento dos parafusos e a própria bolsa de acoplamento, causam uma perturbação adicional ao solo. Isto pode ter diminuído a resistência do solo responsável pela da capacidade de carga relativa às hélices H3 e H4, bem como o próprio atrito lateral nas hastes de extensão. Na Figura 4.13 é apresentado um esquema da ligação para calibração e a zona perturbada pela passagem dos parafusos.

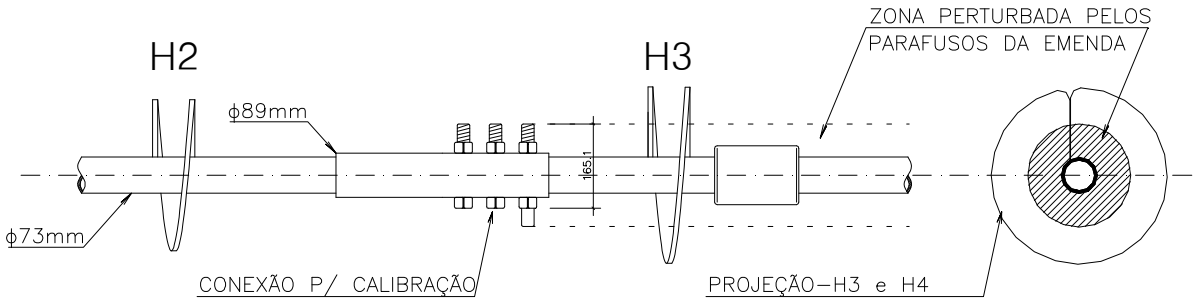


Figura 4.13: Indicação da zona perturbada pela passagem dos parafusos da conexão para calibração.

No entanto, apesar deste detalhe, observou-se que, utilizando-se uma seção guia de menor diâmetro, a contribuição da parcela de resistência por atrito na haste foi superior ao caso de guia com diâmetro igual ao das extensões.

4.2.5. Verificação do efeito de instalação através de injeção de nata de cimento

Após a escavação foi possível acessar a região preenchida pela nata de cimento (Figura 4.14). No momento em que a escavação estava sendo realizada foi feita uma análise tátil-visual do solo retirado do poço e, em conjunto com a sondagem próxima (Figura 3.9) procedeu-se uma análise expedita da consistência do solo onde a estaca foi instalada. Como resultado, obteve-se que o solo é um silte argilo-arenoso de consistência média.

Na Figura 4.14 fica claro que a nata preencheu o espaço vazio ao longo da trajetória percorrida pela hélice no solo durante a instalação, tanto que foram observadas placas de cimento a distâncias correspondentes ao passo das hélices.

Figura 4.14: Estaca após injeção e endurecimento da nata de cimento.

O formato apresentado pela nata de cimento endurecida indica que o solo enfraquecido encontra-se contido na região cilíndrica determinada pelo diâmetro revolucionado das hélices e a profundidade de instalação, pois, não foi observado espalhamento lateral de nata, para fora desta região.

Observou-se que a passagem das hélices deixa no solo um vazio em forma de helicóide, com passo igual ao passo das hélices da estaca (Figura 4.14) e diâmetro externo igual ao diâmetro revolucionado da maior hélice que atravessou aquela posição. Durante a injeção, a nata fluida ao sair pelos furos na ponta estaca, tomou este verdadeiro "caminho" preenchendo o vazio.

Este fato mostra que neste solo coesivo e não saturado, após a penetração da hélice, é deixado um volume vazio (ou de solo solto com baixa compacidade) na forma de um helicóide equivalente à trajetória da hélice no terreno durante a instalação da estaca. Este efeito danoso da instalação da estaca no solo acima das hélices influencia certamente o comportamento da estaca quando submetida à tração.

4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NO SOLO DA ÁREA 1

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório realizados nas amostras retiradas do solo de instalação das hélices das estacas instaladas na Área 1.

Foram realizados ensaios de resistência (triaxiais e compressão simples) nas amostras indeformadas e para os de caracterização (granulometria, limites de Atterberg e peso específico dos grãos), foi utilizado o solo proveniente da moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência, que foram talhados.

4.3.1. Ensaios de caracterização

Para uma melhor compreensão do comportamento, realizaram-se ensaios de caracterização do solo amostrado na Área 1. A Figura 4.15 apresenta a curva resultante da analise granulométrica conjunta (sedimentação com defloculante) realizada de acordo com a NBR 7181 (1984).

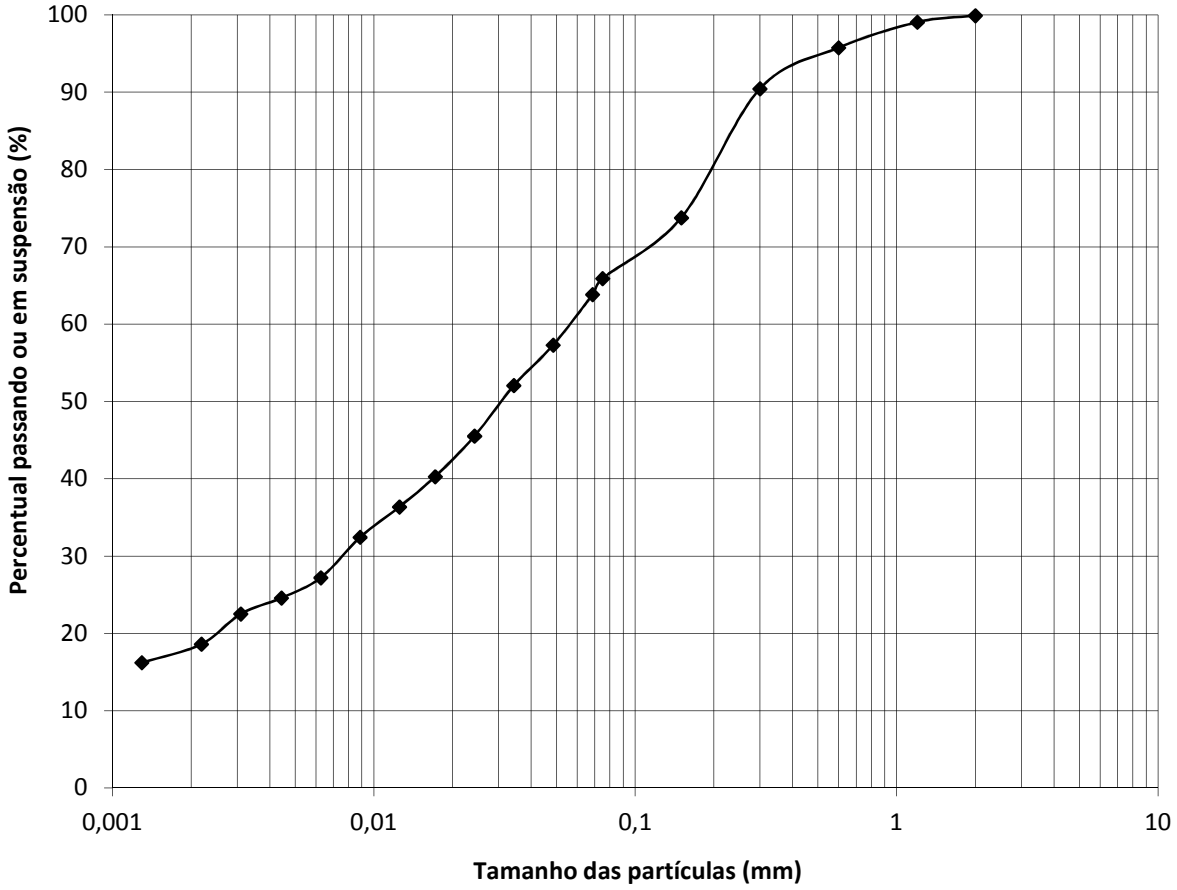


Figura 4.15: Curva granulométrica.

Com base na curva granulométrica obtida, o solo em estudado é classificado, de acordo com a NBR 6484 (2001) e a NBR 6502 (1995), como silte areno-argiloso. Como o material em questão é um solo residual de diabásio (NISHIYAMA, 1991), a fração areia identificada na análise granulométrica trata-se de fragmentos minerais menos alterados, e não grãos de quartzo.

Os resultados dos ensaios de limites de Atterberg (limite de liquidez e de plasticidade) realizados de acordo com as normas NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984), bem como o peso específico (obtido a partir dos corpos de prova dos ensaios triaxiais) e o peso especifico dos grãos, realizado de acordo com a NBR 6508 (1984), são apresentados na Tabela 4.9. Observa-se que o material em estudo trata-se de um solo de alta porosidade, não saturado e medianamente plástico.

Tabela 4.9: Propriedades físicas do solo.

Propriedade	Valor
Composição granulométrica	Areia: 38% Silte: 44% Argila: 18%
Peso específico (kN/m³)	15,0
Peso específico seco (kN/m³)	11,2
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	29,1
Índice de vazios	1,60
Porosidade (%)	62
Umidade (%)	34
Grau de saturação (%)	72
Limite de Liquidez (%)	58
Limite de Plasticidade (%)	44

4.3.2. Ensaios de compressão triaxial

4.3.2.1. Curvas tensão *versus* deformação

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam os gráficos tensão desviatória ($\Delta\sigma$) e poro-pressão (u) *versus* deformação vertical (ε) obtidos nos ensaios de compressão triaxial realizados com o solo amostrado na Área 1, nas condições perturbado pela instalação da estaca e não-perturbado (intacto). A legenda indica as pressão de confinamento (σ_3) utilizadas. Devido à inexistência de norma brasileira os ensaios de compressão triaxial foram realizados de acordo com a norma ASTM D 4767 (2011).

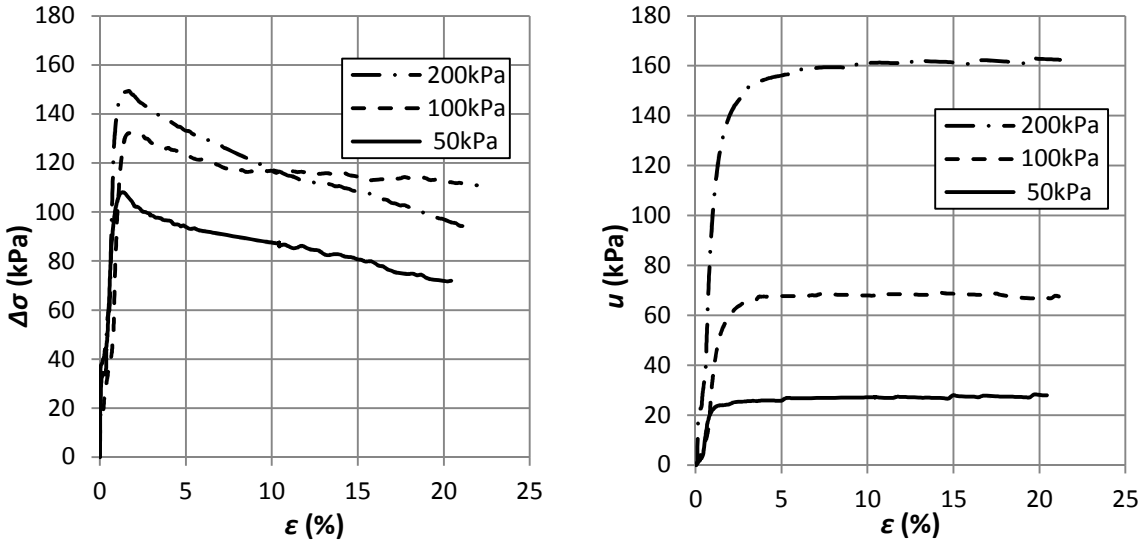


Figura 4.16: Curvas tensão desviatória *versus* deformação e poro-pressão *versus* deformação do solo não perturbado (intacto).

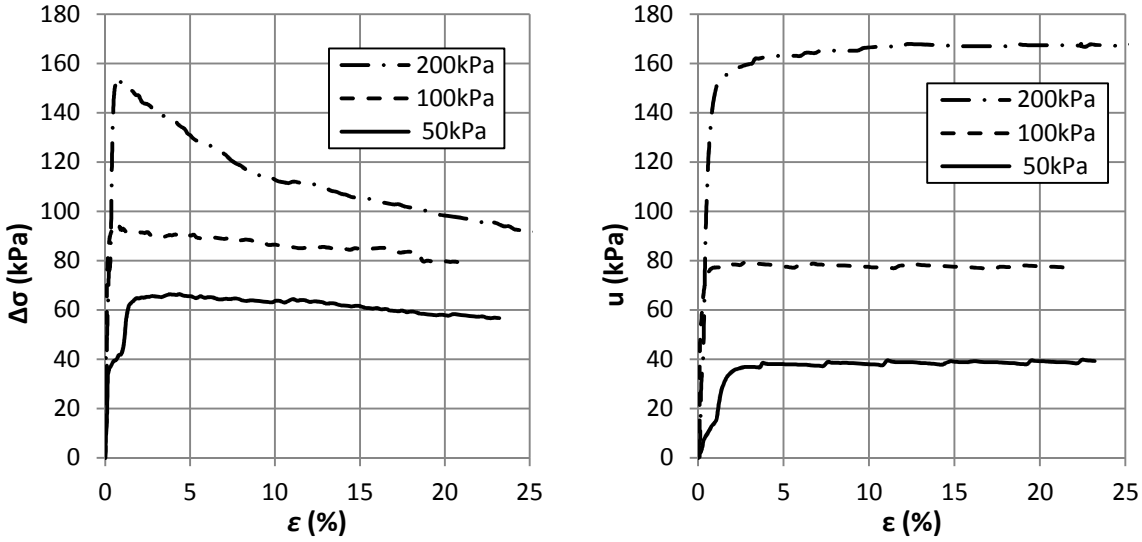


Figura 4.17: Curvas tensão desviatória *versus* deformação e poro-pressão *versus* deformação do solo perturbado.

Analisando-se as curvas tensão *versus* deformação é possível observar que o solo não perturbado apresenta picos de resistência bem pronunciados, característicos de solos estruturados. Já o solo perturbado pela instalação da estaca não apresenta tais picos, indicando que a instalação da estaca destrói a estrutura do solo.

A distância da estaca ao corpo de prova perturbado, rompido com σ_3 igual a 200 kPa foi maior em relação aos demais corpos de prova retirados do bloco de solo perturbado pela instalação. Devido a isto, a curva tensão *versus* deformação deste corpo de prova

apresentou comportamento similar ao dos corpos de prova retirados do bloco não-perturbado. Nota-se apenas uma pequena indicação de perturbação causada pela instalação quando observa-se o gráfico apresentado na Figura 4.18, que será discutida a seguir.

4.3.2.2. Parâmetro *A* de Skempton

A perda da estrutura é evidenciada quando são comparadas as curvas do parâmetro *A* de Skempton *versus* deformação (ε) (Figura 4.18). Para as condições em que ensaio foi realizado o parâmetro *A* é dado por acréscimo da poro-pressão (Δu) sobre acréscimo da tensão principal 1 ($\Delta\sigma_1$). No solo perturbado pela instalação ocorre uma maior geração de poro-pressão em relação ao acréscimo de tensão cisalhante, indicando a desestruturação em relação ao solo não-perturbado.

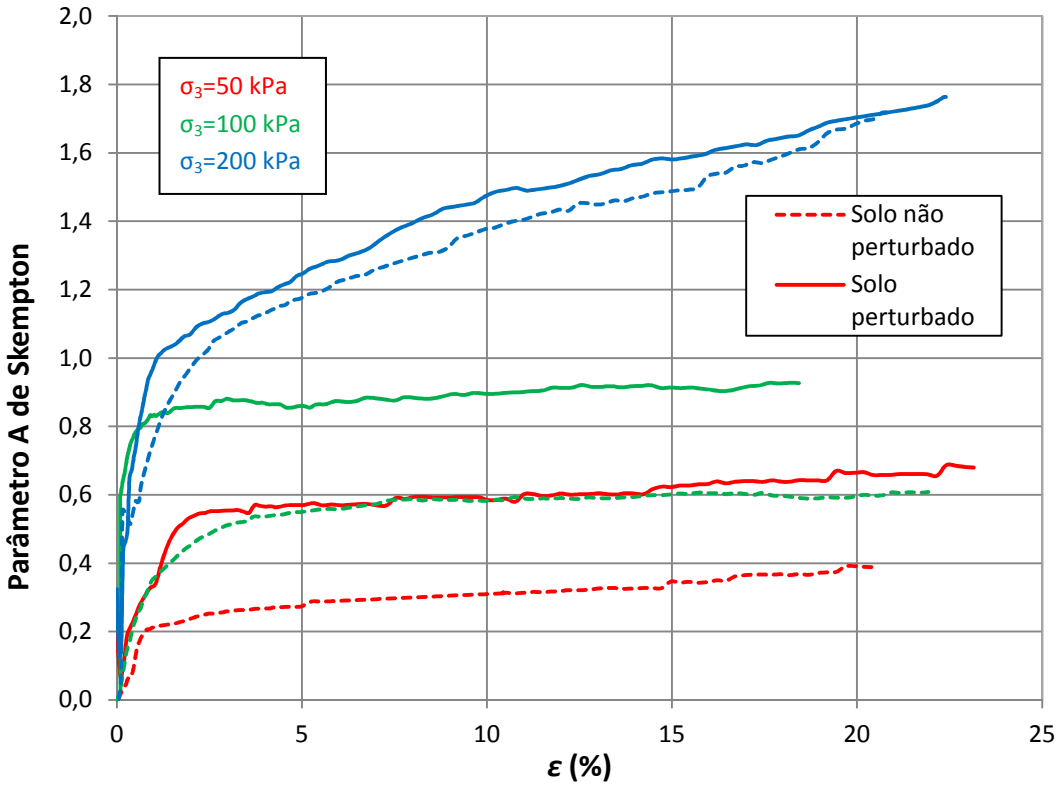


Figura 4.18: Curvas Parâmetro *A versus* deformação.

4.3.2.3. Parâmetros de resistência

A Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam as envoltórias de resistência para resistência de pico do solo não perturbado e perturbado, em termos de tensões efetivas. As tensões de rupturas para definição das envoltórias foram estabelecidas a partir dos gráficos da relação

σ_1'/σ_3' *versus* deformação (ε). Esta forma de interpretação é recomendada por Vilar (1994) para ensaios triaxiais não-drenados em solos estruturados em que a poro-pressão continua a crescer após a tensão de ruptura. Também são apresentados os círculos de Mohr representativos dos ensaios de compressão não confinada, que foram realizados na umidade natural.

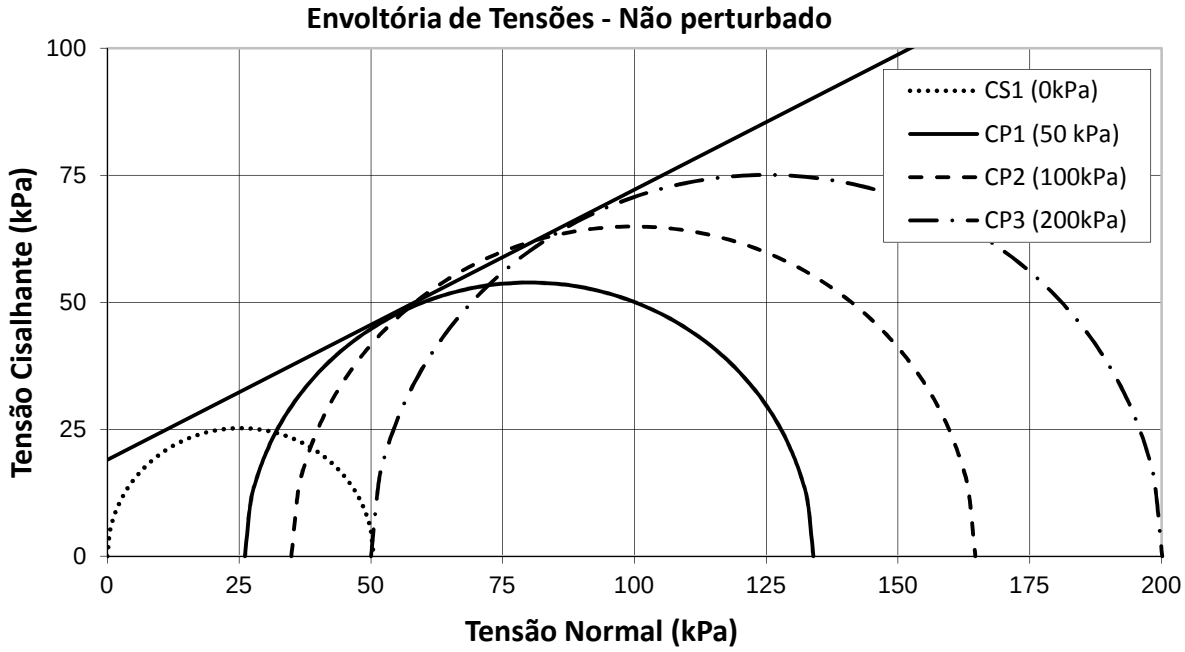


Figura 4.19: Envoltória de ruptura (tensões efetivas) do solo não perturbado.

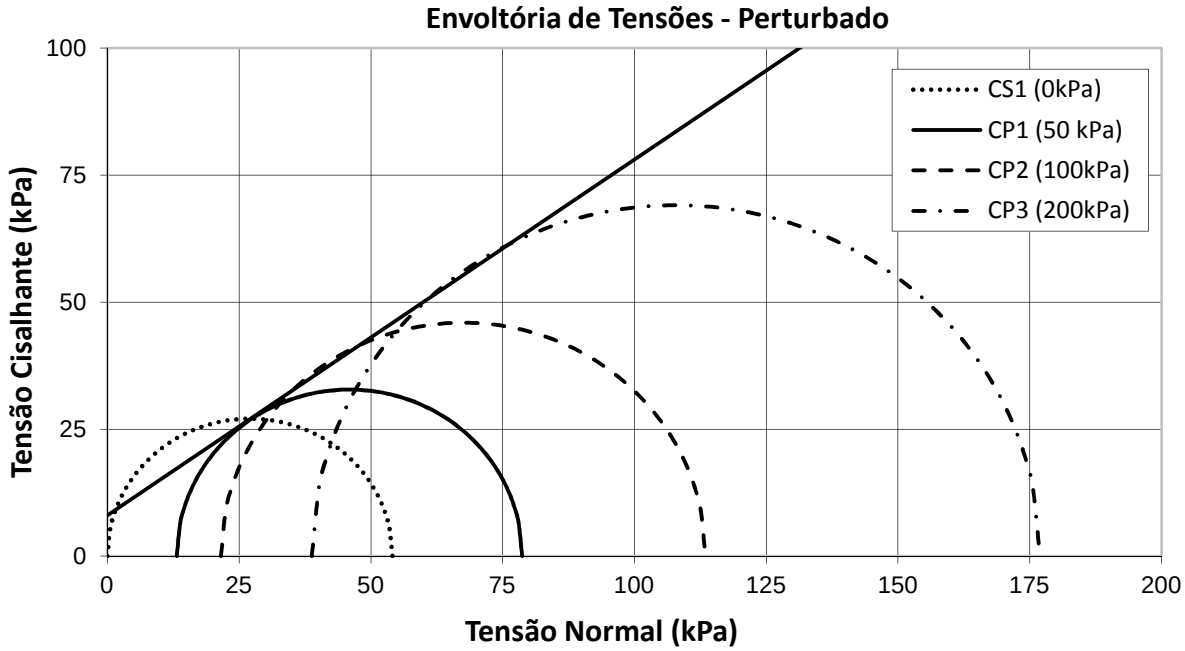


Figura 4.20: Envoltória de ruptura (tensões efetivas) do solo perturbado.

A Tabela 4.10 apresenta os parâmetros de resistência (pico), em termos de tensões efetivas, apresentados pelo solo nas condições não-perturbado (sem influência da instalação) e perturbado (após a instalação e prova de carga da estaca C3.

Tabela 4.10: Parâmetros de resistência efetivos (pico).

Condição do solo	Não perturbado	Perturbado
ϕ' (graus)	28	35
c' (kPa)	19	8

Observa-se uma diferença significativa nos parâmetros de resistência do solo intacto e do solo perturbado (próximo a estaca). A diminuição de intercepto coesivo no solo perturbado está relacionada à quebra das ligações inter-partículas (estrutura) provocada pela instalação da estaca. No entanto, como um dos corpos de prova de solo perturbado (rompido com σ_3 igual a 200 kPa) estava mais afastado da estaca, provavelmente pode ter influenciado o resultado do ângulo de atrito do solo perturbado.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos resultados dos ensaios realizados nesta dissertação permitiram as seguintes conclusões:

a) Provas de carga a tração *versus* compressão em solo residual não saturado (Área 1)

O efeito da instalação das hélices no solo tropical poroso da Área 1 (com N_{SPT} entorno de 7 e não saturado) proporcionou uma capacidade de carga à tração da hélice (em solo perturbado) em torno de cinco vezes inferior à de compressão (em solo intacto). Este fato indica que estacas helicoidais ancoradas neste solo serão pouco eficientes, devido à grande perda de estrutura do solo causada pela instalação da estaca, sendo recomendado então utilizar outra solução de fundação. Em solos mais resistentes e abaixo do nível d'água, como o caso apresentado no item 2.5, já não ocorre perda de resistência tão pronunciada.

b) Medida do torque de instalação ao longo da estaca (Área 2)

Observou-se que cada parte da estaca contribui com uma parcela significativa do torque aplicado durante a instalação. A parcela de torque resistido pelas hastes de extensão foi especialmente importante neste caso de seção guia com diâmetro da haste reduzido, chegando a 50% do torque total aplicado ao topo da composição. No controle da capacidade de carga da estaca por meio do fator de torque K_t, deve-se considerar cada parcela da estaca individualmente, pois, como foi observado, cada parte da estaca contribui de forma diferente com o torque de instalação e a capacidade de carga.

c) Provas de carga instrumentadas

A maior parte da capacidade de carga das estacas é proporcionada pela seção guia, ou seja, é resistida pelas hélices. No entanto, observou-se que a parcela de atrito lateral foi bastante significativa quando usou-se a seção guia com diâmetro da haste reduzido. Como o número de vezes que o solo é cortado pelas hélices afeta sua resistência, os métodos de previsão de capacidade de carga à tração de estacas helicoidais devem considerar a posição da hélice na estaca.

d) Guia com diâmetro reduzido em relação às hastes de extensão

Foi observado que estacas com seções guias de diâmetros diferentes apresentam comportamento carga *versus* deslocamento similar. A maior diferença percebida foi no torque de instalação, indicando que a estaca com guia reduzida causa menor perturbação ao solo durante a instalação. Além disso, por demandar menor torque de instalação, a estaca de seção guia reduzida pode atingir maiores profundidades do que a estaca com seção guia e extensões de mesmo diâmetro. Ou seja, para casos onde a estaca possa ficar curta (com embutimento no solo insuficiente), a estaca de guia reduzida é mais adequada.

e) Injeção de fluido de preenchimento

Através da injeção de fluido de preenchimento foi possível observar a região de solo perturbado pela instalação. Ainda foi constatado que a hélice da estaca, ao cortar o solo durante a instalação, deixa um volume vazio em forma de helicóide contínuo, correspondente ao local atravessado pelas hélices durante a instalação. Analisando uma seção paralela ao eixo da estaca, como os vazios ocorrem a distâncias iguais ao passo das hélices, possivelmente o passo das hélices tem influência na capacidade de carga e deve ser considerado em métodos de previsão.

f) Ensaios de compressão triaxial

A partir da realização dos ensaios de compressão triaxial no solo da Área 1, em condições modificado pela instalação e intacto, observou-se que a instalação da estaca provoca alterações significativas nos parâmetros de resistência do solo que envolve a estaca. Mesmo não sendo o material perturbado amostrado retirado do solo da região cilíndrica, efetivamente cortada pelas hélices, foi possível avaliar a influência da instalação nos parâmetros de resistência. As alterações nos parâmetros de resistência do solo têm influência direta na capacidade de carga da estaca à tração da estaca.

5.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Instrumentar todas as hélices de estacas para medição da carga mobilizada por cada uma delas, a fim de obter uma definição clara da influência do número de vezes que

o solo é cortado pelas hélices na capacidade de carga de cada hélice. Realizar ensaios em solos de diferentes origens e acima e abaixo do nível d'água.

- Instrumentar todas as hélices da estaca para medição e separação de todas as parcelas que compõem o torque de instalação, para que assim sejam estabelecidos valores de K_t para cada hélice e para o fuste;
- Retirar amostras de solo em diferentes níveis para avaliação da perda de resistência em função do número de vezes que é cortado pelas hélices;
- Realizar provas de carga a tração e compressão em estacas helicoidais com uma hélice, instaladas em solos residuais com diferentes valores de N_{SPT}. Realizar ensaios em solos de diferentes origens e abaixo do nível d'água;
- Fazem injeções em estacas instaladas em solos diferentes do desta pesquisa, para verificação do efeito de instalação da estaca helicoidal no solo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. B. CHANCE COMPANY (2002). **Helical pier foundations systems**. Technical Manual, Centralia, Bulletin 01-9601.

- _____ (2010). **Encyclopedia of Anchoring**. Section B: Anchors end Anchor Tools. Centralia, Bulletin 04-9401B.

- ADAMS, J.I. e KLYM, T.W. (1972). **A Study of Anchors for Transmission Tower Foundations.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 89-104.

- ALMEIDA, M.A.; MIGUEL, M.G. e TEIXEIRA, S.H.C. (2011). **Horizontal Beading Capacity of Piles in a Lateritic Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 137 (1), pp. 59-69.

- AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (2011). **D 4767: Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils**. West Conshohocken, 14 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 6 p.

- _____ (1984). **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 8 p.

- _____ (1984). **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 3 p.

- _____ (1984). **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 13 p.

- _____ (1992). **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro, 4 p.

- _____ (1995). **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 18 p.

- _____ (2001). **NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 17 p.

- _____ (2006). **NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 8 p.

- CARVALHO, I.P.G. (2007). **Estudo Teórico-Experimental da Capacidade de Carga à Tração e Compressão de Estacas Metálicas Helicoidais**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 205 p.

- CINTRA, J.C.A. e AOKI, N. (2009). **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. EESC-USP, São Carlos, 108 p.

- CLEMENCE, S.P. (1985). **Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil**. In Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of ASCE, Detroit.

- CLEMENCE, S.P., CROUCH, L.K. e STEPHENSON R.W. (1994). **Prediction of uplift capacity for helical anchors in sand**. Proceedings of 2nd Geotechnical Engineering Conference. Cairo, Egypt, v. I, pp. 332-343.

- CLEMENCE, S.P. e PEPE, F.D. (1984). **Measurement of Lateral Stress Around Multihelix Anchors in Sand**. Geotechnical Testing Journal, vol. 7 (3) pp. 145-152.

- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS - COMIG (1994). **Geologic Map of Minas Gerais**. 1 mapa, color. Scale 1:1.500.000, 1117x792mm.

- DAS, B.M. (1990). **Earth Anchors**. Elsevier Science Publisher, New York, 241 p.

- DÉCOURT, L. (2002). **Capacidade de carga em estacas executadas no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica da Universidade Estadual de Londrina. Algumas ponderações**. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, v. 3, pp. 1545-1555.

- GHALY, A. e HANNA, A. (1991). **Experimental and theoretical studies on installation torque of screw anchors**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28(3), pp. 353-364.

- GHALY, A.; HANNA, A. e HANNA, M. (1991). **Installation torque of screw anchors in sand.** Soils and Foundations, Vol. 31(2), pp. 77-92.

- GUI, M.W. e YU, C.M. (2008). **Rate of strength increase of unsaturated lateritic soil**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 45 (9), pp. 1335-1343.

- HARGRAVE, R.L. e THORSTEN, R.E. (1992). **Helical Piers in Expansive Soils of Dallas, Texas**. 7th International Conference on Expansive Soils, Vol. 1, Lubbock, TX: Texas Tech University Press. pp. 125-130.

- 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.

- ICC-ES (2007). **AC 358: Acceptance Criteria for Helical Foundation Systems and Devices**. International Code Council Evaluation Service, Inc., 21 p.

- KANAI, S. (2007). **A seismic retrofitting application by means of multi-helix micro-piles**. Proceedings of 23th U. S.-Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan.

- KULHAWY, F.H. (1985). **Uplift behavior of shallow soil anchors – an overview**. Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, New York, pp. 1-25.

- KURIAN, N.P. e SHAH, S.J. (2009). **Studies on the behavior of screw piles by the finite element method**. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 46(6), pp. 627-638.

- LITTLE, A.L. (1969). **The Engineering Classification of Residual Tropical Soils**. Proceedings of special Section on Engineering Properties of Lateritic Soils, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, vol. 1, pp.1-10.

- LIVNEH, B., e EL NAGGAR, M.H. (2008). **Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 45(8), 1142-1155.

- LUTENNEGER, 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.

- MAGNUM PIERING, INC. (2010). **Helical Pile Technical Reference Manual**. West Chester, 243 p.

- MEDINA, J. (1997). **Mecânica dos Pavimentos**. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, 380p.

- MELFI, A.J. (1994). **Lateritas e processos de laterização**. Aula inaugural. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- MEYERHOF, G.G. (1951). **The Ultimate Bearing Capacity of Foundations**. Geotechnique, vol. 2 (4), pp. 301-331.

- MEYERHOF, G.G. e ADAMS, J.I. (1968). **The Ultimate Uplift Capacity of Foundations**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 5 (4), pp. 225-244.

- MERIFIELD, R.S. (2011). **Ultimate Uplift Capacity of Multiplate Helical Type Anchors in Clay**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 137(7), pp. 704-716.

- 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.

- MOONEY, J.S.; S. ADAMCZAK JR., S.; e CLEMENCE, S.P. (1985). **Uplift Capacity of Helix Anchors in Clay and Silt**. Proceedings of Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, pp. 48–72.

- NARASIMHA RAO, S.; PRASSAD, M.D.; SHETTY, M.D. e JOSHI, V.V. (1989). **Uplift capacity of screw pile anchors**. Geotechnical Engineering. Vol. 20(2), pp. 35-50.

- NARASIMHA RAO, S.; PRASAD, Y.V.S.N. e SHETTY, M.D. (1991). **The Behavior of Screw Piles in Cohesive Soils**. Soils & Foundations, vol. 31 (2), pp. 35-50.

- NARASIMHA RAO, S.; PRASAD, Y.V.S.N. e VEERESH, C. (1993). **Behavior of embedded model screw anchors in soft clays**. Géotechnique, vol. 43 (4), pp. 605-614.

- NISHIYAMA, L. (1991). **Mapeamento geotécnico preliminar da quadricula de São Carlos – SP.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 228 p.

- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1995). **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, Vilibor, 240 p.

- PERKO, H.A. (2000). **Energy method for predicting the installation torque of helical foundations and anchors.** New Technological and Design Developments in Deep Foundation Technologies, ASCE, pp. 342-352.

- PERKO, H.A. (2009). **Helical Piles: a practical guide for design and installation**. John Wiley & Sons, New York.

- 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.

- REZENDE, L.R. (1999). **Técnicas alternativas para construção de bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 169 p.

- SANTOS, T.C. (2013). **Estudo da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solos tropicais**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 140 p.

- SANTOS, T.C.; TSUHA, C.H.C. e GIACHETI, H.L. (2012). **The use of CPT to evaluate the effect of helical pile installation in tropical soils**. Proceedings of the 4th Geotechical and Geophysical Site Characterization, Porto de Galinhas, pp. 1079-1084.

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

- SCHULZE, T. (2013). **Análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 168 p.

- SILVA, P. F. e VILLEGAS, E. A. (2008). **Corrosão e Monitoramento em Fundações Metálicas**. Gráfica Tamóios, Belo Horizonte, 308p.

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

- TERZAGHI, K. (1943). **Theoretical soil mechanics**. John Wiley & Sons, New York.

- TOLEDO, M.C.M.; DE OLIVEIRA, S.M.B. e MELFI, A. (2000). Intemperismo e Formação do Solo In: TEIXEIRA, W.; DE TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R. e TAIOLI; F. (Org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 557p.

- TROFIMENKOV, J.G. e MARIUPOLSKII, L.G. (1965). **Screw Piles Used for Mast and Tower Foundations**. Proceeding of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Montreal, v.2, pp. 328-332.

- TSUCHIYA, T.; NAKAZAWA, F. e SHIMADA, M. (2007). **Study on Penetration Mechanism of Screw Pile based on Soil Movement around Helical Wing**. Journal of Architecture and Building Science, No.25, pp.73-76 (in Japanese)

- 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, 245 p.

- TSUHA, C.H.C. e AOKI, N. (2010). **Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 47(6), pp. 623-647.

- TSUHA, C.H.C.; AOKI, N.; RAULT, G.; THOREL, L. e GARNIER, J. (2012). **Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 49, pp. 1102-1114.

- TSUHA, C.H.C. (2013). Comunicação pessoal.

- VAUGHAN, P.R. (1985). **Mechanical and Hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particulary as related to their structure and mineral components**. Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasilia, vol. 3, pp. 231-263.

- VARGAS, M. (1985). **The concept of tropical soils**. Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasilia, vol. 3, pp. 101-134.

- VÉRTICE ENGENHARIA (2004). **Produtos e serviços - Estacas Metálicas Helicoidais**. Disponível em: http://www.verticebr.com.br/2004/index.html. Acesso em 23/01/2013.

- VERCON INDUSTRIAL (2013). **Obras Executadas – Álbum de Fotos**. Disponível em: www.vercon.com.br/estacas_obras.asp. Acesso em: 06/02/2013.

- VILAR, O.M. (1994). Mecânica dos Solos - Resistência ao Cisalhamento. **Notas de Aula**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 240p.

- VYAZMENSKY, A.M. (2005). **Numerical Modelling of Time Dependent Pore Pressure Response Induced by Helical Pile Installation**. Master's thesis. University of British Columbia, Vancouver, 201 p.

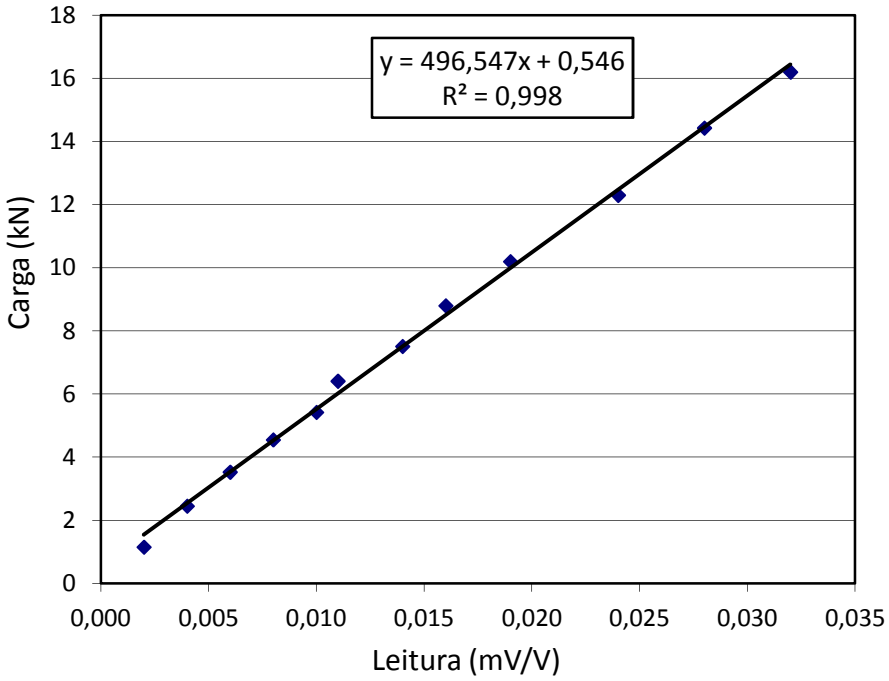
- WEECH, C.N. (2002). **Installation and Load Testing of Helical Piles in a Sensitive Fine-Grained Soil**. Master's thesis. University of British Columbia, Vancouver, 349p.

- YOUNG, J. (2012). **Uplift Capacity and Displacement of Helical Anchors in Cohesive Soil**. Master's thesis. Oregon State University, Corvallis, 177p.

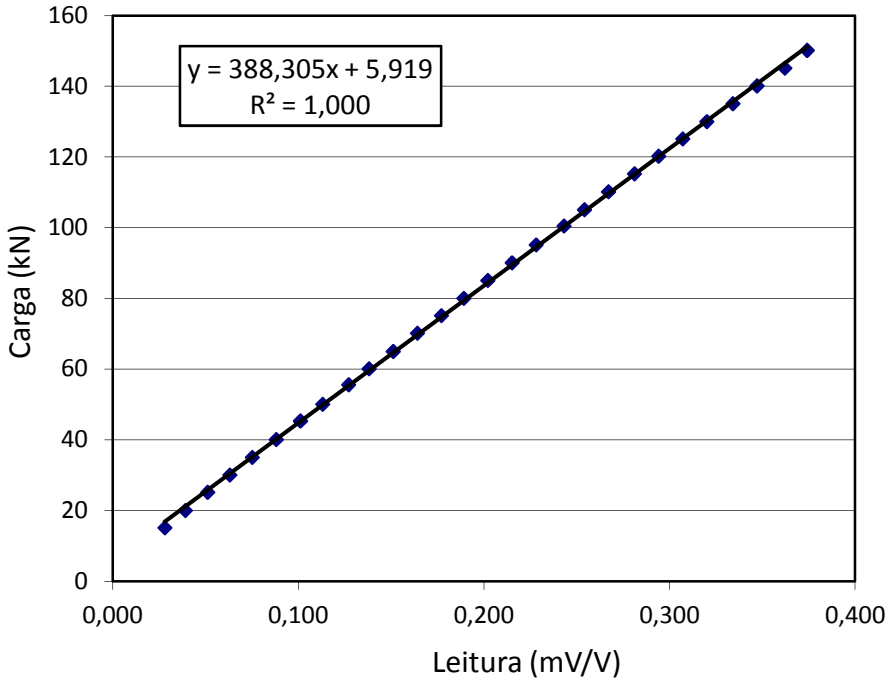
- ZHANG, D.J.Y. (1999). **Predicting Capacity of Helical Screw Piles in Alberta Soils**. Master's thesis, University of Alberta, Edmonton, 334 p.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Curva de calibração da célula de carga: Faixa de 1 a 16 kN.



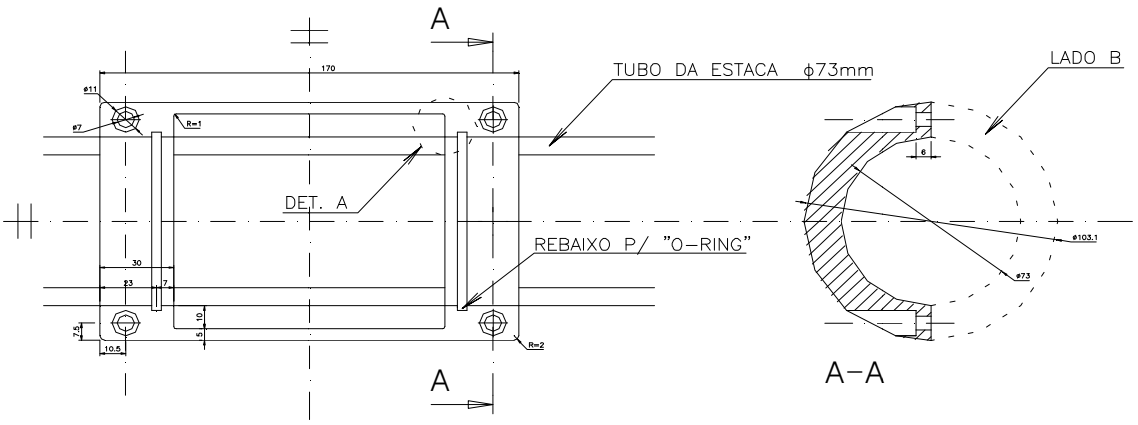
Curva de calibração da célula de carga: Faixa de 15 a 150 kN.



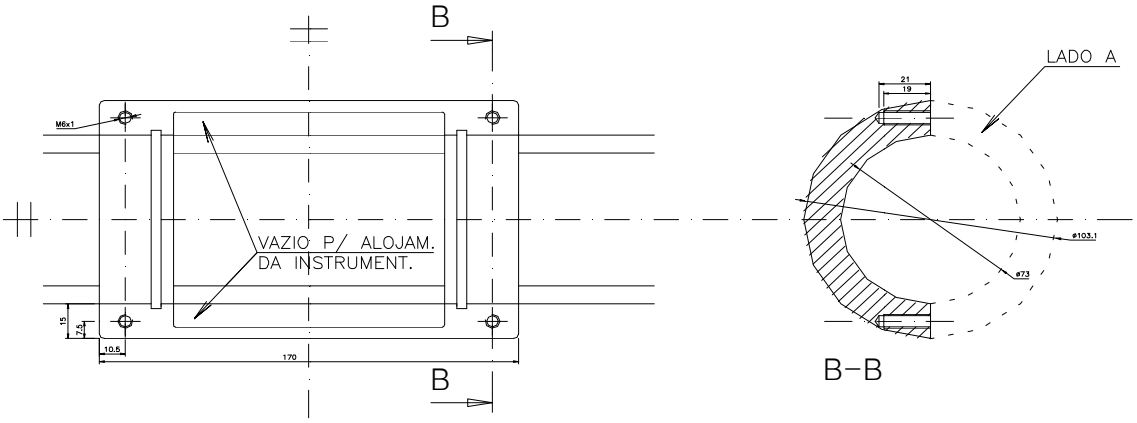
APÊNDICE B – LUVAS DE PROTEÇÃO

Nº	REV. POR	DATA	APROV.	REVISÃO
00		26/02/13		EMISSAO INICIAL

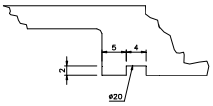
LUVA DE PROTEÇÃO – LADO A



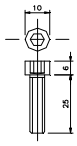
LUVA DE PROTEÇÃO LADO B



DET. A – REBAIXO P/ "O-RING"



DET. DOS PARAFUSOS

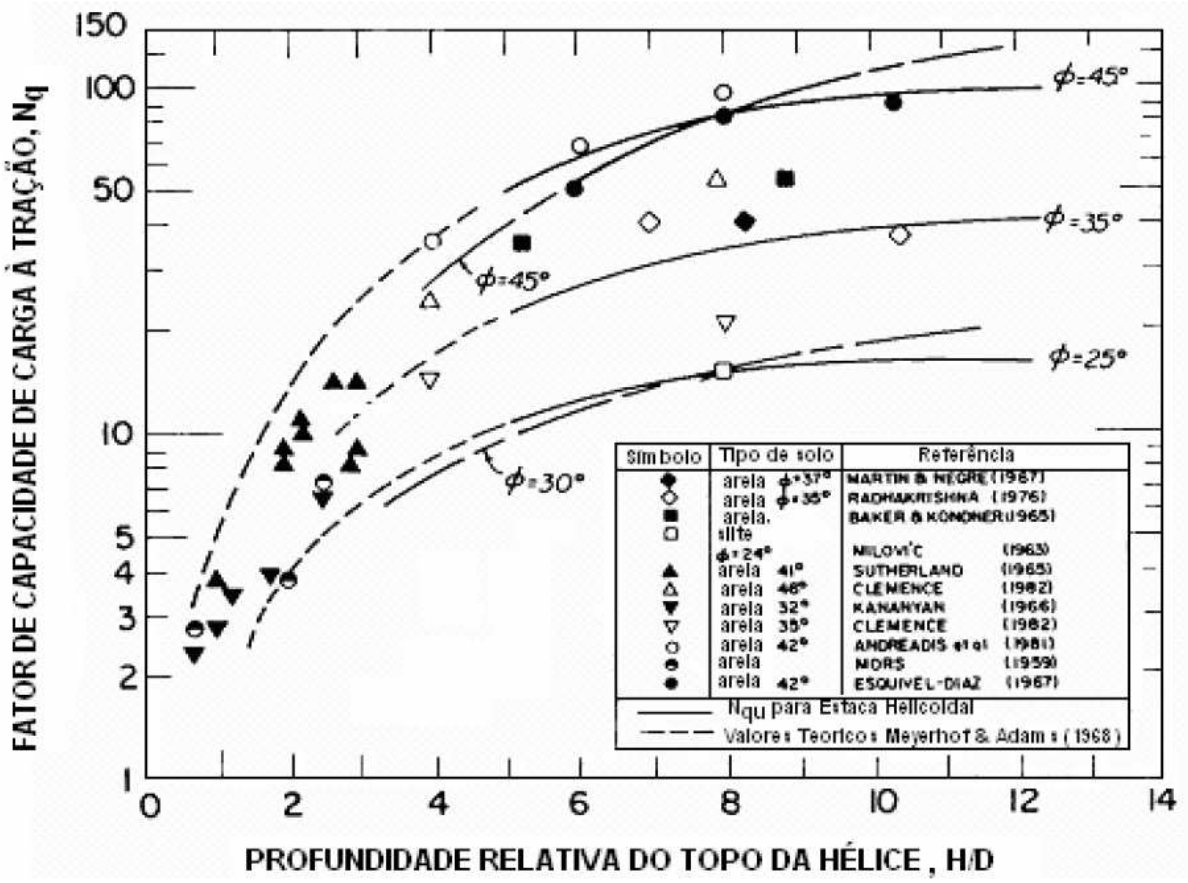


PARAFUSO CABEÇA CILINDRICA
C/ SEXTAVADO INTERNO

CONTATO:			DATA	NOME
jmsmfilho@gmail.com	EESC · USP Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo	DES.	26/02/2013	JOÃO MANOEL
		REV.		
		APR.		
CLIENTE : VÉRTICE ENGENHARIA	OS:	ESCALA S/E – MEDIDAS EM MILÍMETROS		PESO kg
TÍTULO : LUVA DE PROTEÇÃO PARA INSTRUMENTAÇÃO DE ESTACA HELICOIDAL Ø73mm		DESENHO Nº 01/01		

ANEXO A – VALORES DE N_q , N_c e C_a

- N_q: os fatores de capacidade de carga N_q propostos por Mitsch e Clemence (1985) são avaliados a partir do gráfico abaixo.



- N_c: Os fatores de capacidade de carga N_c, propostos por Mooney et al. (1985), podem ser calculados a partir da Equação 7.

$$N_c = 1.2 \cdot \left(\frac{H_1}{D_1} \right) \leq 9 \qquad (7)$$

- C_a: Mooney et al. (1985) indicaram que a magnitude da adesão (C_a) pode variar desde 30% (em argilas duras) a 90% (em argilas moles) da coesão não drenada (c_u).