

JOÃO MANOEL SAMPAIO MATHIAS DOS SANTOS FILHO

Análise do comportamento de fundações por estacas helicoidais com
injeção de calda de cimento

Tese apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^a. Dr. Cristina de
Hollanda Cavalcanti Tsuha

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos
2019

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

SS237a	<p>Santos Filho, João Manoel Sampaio Mathias dos Análise do comportamento de fundações por estacas helicoidais com injeção de calda de cimento / João Manoel Sampaio Mathias dos Santos Filho; orientadora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos, 2019.</p> <p>Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.</p> <p>1. fundações. 2. estacas helicoidais. 3. capacidade de carga à tração. 4. melhoria de solo. 5. injeção de calda de cimento. I. Título.</p>
--------	---

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Título da Tese: "Análise do comportamento de fundações por estacas helicoidais com injeção de calda de cimento".

Data da defesa: 24/06/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Dr. **David de Carvalho**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Fernando Artur Brasil Danziger**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

APROVADO

Prof. Dr. **Jeselay Hemeitério Cordeiro dos Reis**
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

APROVADO

Prof. Dr. **Nelson Aoki**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa. Cristina Tsuha, por todo o apoio, amizade, dedicação e oportunidade de conduzir este trabalho.

Agradeço à Vercon Industrial e à Vértice Engenharia pelo suporte no fornecimento de materiais, equipamentos e pessoal, durante todas as fases de realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos técnicos e pessoal da administração do Departamento de Geotecnia da EESC-USP (Oscar, Zé Luis, Benedito, Cléver, Décio, Thiago, Ademar, Damiana, Herivelto, Benê, Neiva, Maristela, Álvaro, Toninho) por todo o apoio e presteza na solução de todas as demandas.

Agradeço à toda a minha família, especialmente à minha noiva, Thaise, por todo o amor e compreensão.

Aos amigos do departamento de Geotecnia e de fora dele (Roberto, Murilo, Ivan, Diego, Lucas, Nenê, Juliana, Aguinaldo, Talita, Carolina, Edson, Adilson, Loana, Wilson, Bruno, João, Lafaiete, Nestor, Zé, Edilson, Jefferson, Ricardo, Luiz, Malcon, Milena, Alfredo, Sinésio, Zilmon) pela boa convivência e compartilhamento de ideias e conhecimentos, que muito contribuíram no desenvolvimento deste trabalho e realização de ensaios nos campos experimentais.

RESUMO

SANTOS FILHO, J.M.S.M. **Análise do comportamento de fundações por estacas helicoidais com injeção de calda de cimento**. 2019. 170 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Durante a instalação de estacas helicoidais, a passagem das hélices cisalha o solo e o desloca lateralmente e verticalmente, e conseqüentemente suas propriedades iniciais são modificadas. Em algumas regiões no Brasil são encontradas espessas camadas de solos tropicais estruturados e especialmente sensíveis, onde este efeito costuma ser significativo. Por esta razão, nestes terrenos as estacas helicoidais têm sido instaladas em grandes profundidades para que a capacidade de carga definida em projeto seja atendida. Estas estacas têm sido frequentemente utilizadas em extensas linhas de transmissão de energia em nosso país, por apresentar grandes vantagens para este tipo de obra; no entanto, nestes terrenos em que são necessárias estacas muito longas, este tipo de fundação pode se tornar economicamente inviável. Deste modo, a presente pesquisa de doutorado foi realizada com o objetivo de estudar uma solução para este problema, típico em obras de torres de linhas de transmissão de energia no Brasil. Neste tipo de aplicação, as estacas helicoidais são submetidas a elevados esforços de tração devido à ação do vento, e a zona de solo que suporta o carregamento é justamente a região acima das hélices, que sofre perturbações pelo processo de instalação. Para este estudo, foram desenvolvidos dois diferentes procedimentos de injeção de calda de cimento para reforçar o solo na região das hélices da estaca; no primeiro, um sistema de vedação foi desenvolvido para injetar a calda de cimento sob pressão pela haste central da estaca; para o segundo procedimento, foi desenvolvido um obturador inflável para melhorar o desempenho da zona reforçada. Para avaliar estas soluções, foram realizadas provas de carga em um grande número de estacas instaladas em quatro terrenos distintos. Os resultados mostram que os dois procedimentos testados aumentam a capacidade de carga à tração e melhoram o comportamento carga-deslocamento da fundação. Por fim, é apresentada uma proposta para o dimensionamento deste tipo de estaca reforçada com calda de cimento.

Palavras-chave: fundações, estacas helicoidais, capacidade de carga à tração, melhoria de solo, injeção de calda de cimento.

ABSTRACT

SANTOS FILHO, J.M.S.M. **Analysis of the behavior of helical piles with cement injection**. 2019. 170 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

During the installation of helical piles, the soil penetrated is sheared and moved laterally and vertically, and consequently its initial properties are modified. In some regions in Brazil, thick layers of structured and especially sensitive tropical soils are found, where this effect is usually significant. For this reason, in these cases the helical foundations have been installed at great depths to provide the ultimate capacity defined in the design. These piles have been frequently used in extensive transmission lines in our country due to many advantages for this type of work; however, in these areas where very deep piles are required, this type of foundation becomes economically unfeasible. Thus, the present research was carried out with the objective of studying a solution to this problem, typical in the construction of transmission lines towers in Brazil. In this type of application, the helical piles are subjected to high tensile loads due to the action of the wind, and the area of soil that supports the loading is precisely the region above the helices, which is disturbed by the installation process. For this study, two different cement injection procedures were developed to reinforce the soil in the zone of the pile helices. In the first, a sealing system was developed to inject the cement slurry under pressure in the central rod of the pile. For the second procedure, an inflatable obturator was developed to improve the performance of the reinforced zone. To evaluate these solutions, loading tests were carried out on a large number of piles installed in four different sites. The results show that the two procedures tested increase the uplift capacity and improve the load-displacement behavior of the foundation. Finally, a proposal is presented for the prediction of the uplift capacity of helical piles with cement injection.

Keywords: Foundations, helical piles, uplift capacity, soil improvement, cement injection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Visão Geral do SIN (ONS, 2019b).....	28
Figura 3.1: Farol de Maplin Sands (PERKO, 2009).	35
Figura 3.2: (a) Hélices recém conformadas, (b) Soldagem de uma hélice à haste central de uma estaca.....	36
Figura 3.3: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal.....	36
Figura 3.4: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas.....	37
Figura 3.5: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).	40
Figura 3.6: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo não-coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).	41
Figura 3.7: Equipamento de instalação de estacas helicoidais.	42
Figura 3.8: (a) Torquímetro para acompanhamento da instalação e (b) detalhe do torquímetro.	44
Figura 3.9: Regiões de ocorrência de solos lateríticos no Brasil (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).	45
Figura 3.10: Cargas mobilizadas pelas hélices e pelas hastes (atrito lateral) em prova de carga à tração de estaca helicoidal multi-hélice, ensaio IN2 (adaptado de SANTOS FILHO, 2014). .	48
Figura 3.11: Parcelas de resistência mobilizadas em uma fundação por estaca helicoidal submetida à (a) compressão e (b) à tração, pelo método da ruptura cilíndrica (adaptado de PERKO, 2009).	49
Figura 3.12: Parcelas de resistência mobilizadas em uma fundação por estaca helicoidal submetida a (a) compressão e (b) tração, pelo o método das capacidades individuais (Adaptado de PERKO, 2009).	52
Figura 3.13: Mecanismo de penetração de uma hélice (adaptado de KANAI, 2007).	54
Figura 3.14: 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).	56
Figura 3.15: Injeção por fraturamento hidráulico (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).	60

Figura 3.16: Densificação do solo pela injeção de compactação (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).	61
Figura 3.17: Solidificação do maciço pela permeação da calda (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).	62
Figura 3.18: Execução de uma coluna de Jet Grouting (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017). .	63
Figura 3.19: Posicionamento das estacas de reforço (MANKE, 2004).....	65
Figura 3.20: Curvas carga vs. deslocamento das provas de carga realizadas nos modelos, sendo (a) de compressão e (b) de tração (KHAZAEI e ESLAMI, 2016).....	66
Figura 3.21: Detalhe das placas de calda endurecida (SANCHEZ, 2014).	68
Figura 3.22: Configuração das estacas ensaiadas (NABIZADEH e CHOBBASTI, 2016).	69
Figura 4.1: Localização das áreas experimentais.	70
Figura 4.2: (a) e (c) Retroescavadeira e caminhão guindauto com moto-redutor hidráulico acoplados para instalação de estacas helicoidais e (b) torquímetro digital inserido na composição de instalação.	72
Figura 4.3: Seção guia das estacas de três hélices e posicionamento dos furos para saída de calda.	74
Figura 4.4: Seção guia das estacas de quatro e seis hélices e posicionamento dos furos para saída de calda.....	74
Figura 4.5: Extensão com duas hélices para composição de estacas de seis hélices.	74
Figura 4.6: Detalhe da furação para saída da calda.....	76
Figura 4.7: Equipamentos e ferramentas utilizados na injeção de calda de cimento: (a) misturador elétrico, (b) reservatório de calda pronta, (c) bomba de pistão e (d) obturador para acoplamento da linha de injeção à estaca.....	77
Figura 4.8: Vedação das bolsas de acoplamento.....	78
Figura 4.9: Vedação dos parafusos.	79
Figura 4.10: Obturador inflável montado em extensão de estaca helicoidal.....	80
Figura 4.11: Posição do obturador inflável na composição da estaca.	81
Figura 4.12: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à tração em estacas verticais. 84	

Figura 4.13: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à tração em estacas inclinadas.	84
Figura 4.14: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à compressão.	85
Figura 4.15: Visão geral da Área 1.	88
Figura 4.16: Localização das estacas ensaiadas e dos pontos onde foram realizados ensaios <i>in situ</i> na Área 1 (medidas em metros).	89
Figura 4.17: Perfil geotécnico provável da Área 1, profundidade em metros (SANTOS FILHO, 2014).	90
Figura 4.18: Resultados de ensaios <i>in situ</i> realizados na Área 1 (TSUHA et. al, 2015).	91
Figura 4.19: Visão geral da Área 2.	92
Figura 4.20: Localização das estacas ensaiadas e das sondagens à percussão realizadas na Área 2 (medidas em metros).	93
Figura 4.21: Perfil geotécnico provável da Área 2 (medidas em metro).	94
Figura 4.22: (a) e (b) Vista geral da Área 3.	95
Figura 4.23: Localização das estacas ensaiadas na Área 3 (medidas em metros).	96
Figura 4.24: Geometria das estacas destinadas a exumação para verificação de espalhamento da calda injetada no solo (medidas em milímetro): (a) INJ-2H-101-EXUM e (b). INJ-S-2H-101-EXUM.	97
Figura 4.25: Escavação entre as estacas para verificação do espalhamento da calda no maciço de solo com a (a) retroescavadeira e (b) processo manual.	98
Figura 4.26: Perfil geotécnico provável da Área 3, a partir da 3ª campanha de sondagens à percussão (SANTOS, 2001).	99
Figura 4.27: Resultado de ensaios <i>in situ</i> Área 3 (MACHADO e VILAR, 2002).	100
Figura 4.28: Localização da Área 4 em relação a cidades próximas e rodovias (GOOGLE EARTH, 2019).	101
Figura 4.29: Sondagem representativa da Área 4.	102
Figura 4.30: Localização das estacas ensaiadas e da sondagem de referência da Área 4 (medidas em metro).	103

Figura 5.1: Torque desenvolvido na instalação <i>versus</i> profund. das estacas dos Grupos G1 (a) e G2 (b).....	104
Figura 5.2: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G1.....	105
Figura 5.3: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G2.....	105
Figura 5.4: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas dos grupos G3 (a) e G4 (b).....	108
Figura 5.5: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas dos grupos G5 (a) e G6 (b).....	109
Figura 5.6: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G3.....	111
Figura 5.7: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G4.....	112
Figura 5.8: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G5.....	112
Figura 5.9: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G6.....	113
Figura 5.10: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas do grupo G7....	114
Figura 5.11: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G7.	115
Figura 5.12: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas dos grupos G8 e G9.	117
Figura 5.13: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas do grupo G10..	118
Figura 5.14: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G8.	118
Figura 5.15: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G9.	119
Figura 5.16: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G10.	119
Figura 5.17: (a) Vista interna do obturador inflável da estaca INJ-S-01-4H-101-T-G9 entupida por (b) limalha de aço. (c) Vista interna do obturador inflável da estaca INJ-S-02-4H-101-T-G9 entupida por pedras britadas.	122
Figura 5.18: Perfil de torque desenvolvido durante a instalação das estacas destinadas à exumação.	124
Figura 5.19: Aspecto da estaca INJ-2H-101-EXUM ao final da injeção. Detalhe da calda extravasada na superfície, percolada pela interface estaca-solo.....	125

Figura 5.20: Aspecto da estaca INJ-S-2H-101-EXUM ao final da injeção. Detalhe para ocorrência do extravasamento afastado da estaca.	126
Figura 5.21: (a) Vista da porção superior (superfície do terreno até 2,0 m de profundidade) da estaca INJ-2H-101-EXUM. Em destaque, veio de calda endurecida proveniente da estaca INJ-S-2H-101-EXUM seccionado pela escavação mecanizada. (b) Detalhe das “placas” de calda endurecida.....	127
Figura 5.22: (a) Vista da porção inferior (ponta da estaca até o obturador inflável) da estaca INJ-S-2H-101-EXUM e (b) detalhe da hélice da ponta e zona abaixo da ponta, onde não foi encontrada calda de cimento endurecida.....	128
Figura 5.23: Detalhes das (a) lentes formadas junto ao obturador inflável e (b) do aspecto da zona acima do dispositivo, na estaca INJ-S-2H-101-EXUM.	129
Figura 5.24: Curvas torque de instalação <i>versus</i> profundidade das estacas dos grupos (a) G11 e (b) G12.	131
Figura 5.25: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G11 (carregamento de tração).....	132
Figura 5.26: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das estacas do grupo G12 (carregamento de compressão).	132
Figura 5.27: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas de referência (REF) dos grupos G11 e G12.....	134
Figura 5.28: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas injetadas sem obturador inflável (INJ) dos grupos G11 e G12.....	135
Figura 5.29: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas injetadas com obturador inflável (INJ-S) dos grupos G11 e G12.....	136
Figura 5.30: Tendência de variação da melhoria na carga última convencional (Q _U) em relação ao torque final médio de instalação (T _M).	140
Figura 5.31: Tendência de variação da melhoria no fator torque (K _t) em relação ao torque final médio de instalação (T _M).	141
Figura 5.32: Tendência de variação da melhoria na carga última convencional (Q _U) em relação ao volume injetado (V _{inj}).....	143

Figura 5.33: Tendência de variação da melhoria no fator torque (K_t) em relação ao volume injetado (V_{inj})..... 143

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores de K_t de acordo com AC 358 (ICCES, 2012).....	43
Tabela 3.2: Valores de K_u (MITSCH e CLEMENCE, 1985)	54
Tabela 3.3: Valores de $(H_1/D_1)_{cr}$ em função do ângulo de atrito (DAS, 1990).....	58
Tabela 4.1: Resumo das composições e suas denominações.	75
Tabela 4.2: Resumo das estacas dos grupos G1 e G2, instaladas e ensaiadas na Área 1.	90
Tabela 4.3: Resumo das estacas dos grupos G3 a G7 instaladas e ensaiadas na Área 2.	92
Tabela 4.4: Resumo das estacas dos grupos G8 a G10 instaladas e ensaiadas na Área 3.	99
Tabela 4.5: Frações granulométricas dos solos da Área 3 (MACHADO, 1998).	100
Tabela 4.6: Resumo das estacas dos grupos G11 e G12 instaladas e ensaiadas na Área 4...	102
Tabela 5.1: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas dos grupos G1 e G2.	106
Tabela 5.2: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas dos grupos G3 a G6.	110
Tabela 5.3: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G7.....	115
Tabela 5.4: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G8.....	120
Tabela 5.5: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G9.....	121
Tabela 5.6: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G10.....	123
Tabela 5.7: Resumo dos dados de injeção e instalação das estacas destinadas à exumação.	125
Tabela 5.8: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G11 e G12.	133

Tabela 5.9: Dados de instalação, injeção, e provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de capacidade de carga.	137
Tabela 5.10: Resumo dos dados de instalação e injeção, resultados das provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de deslocamento.....	146
Tabela 5.11: Resumo das áreas efetivas das hélices de cada composição ensaiada.	149
Tabela 5.12: Fatores de capacidade de carga à tração avaliados para estacas.	150
Tabela 5.13: Resumo dos fatores de capacidade de carga à tração das estacas instaladas em solos arenosos.....	151
Tabela 5.14: Resistências ao cisalhamento do solo independentes da tensão normal retroanalizadas das capacidades de carga à tração das estacas instaladas em solos argilosos.	153
Tabela 5.15: Resumo das resistências ao cisalhamento do solo independentes da tensão normal avaliadas à tração para as estacas instaladas em solos argilosos.....	153

LISTA DE SÍGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Acceptance Criteria</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
COR	Relativo a Corten, nome comercial, antiga marca de aço tipo patinável
COV	Coeficiente de variação
CP	Cimento Portland
CPT	Cone Penetration Test
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EXUM	Estaca injetada destinada a exumação, não ensaiada
H/h	Homem-hora
ICCES	<i>International Code Council, Evaluation Service</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INJ	Estaca helicoidal injetada
INJ-S	Estaca helicoidal injetada dotada de obturador inflável
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISSMEF	<i>International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering</i>
LT	Linha de transmissão de energia elétrica, aérea

MA	Estado do Maranhão
MG	Estado de Minas Gerais
N.A.	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
O&M	Operação e manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PBA	Plano Básico Ambiental
PCM	Pés cúbicos por minuto
PRAD	Plano de recuperação de áreas degradadas
PVC	Policloreto de vinila
REF	Estaca de referência, sem injeção de calda de cimento
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	Estado de São Paulo
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
T/C	Relação entre a capacidade de carga a tração e a compressão de uma de uma estaca ou de duas estacas de geometricamente iguais e instaladas em condições similares, num mesmo terreno.
VMB	Vallourec & Mannesmann do Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

4x4	Veículo ou equipamento sobre pneus com tração integral
A	Área da seção transversal da haste central da estaca (área de aço)
A_T	Área efetiva de hélice total da estaca.
a:c	Relação água/cimento, traço de calda de cimento
A_i	Área efetiva da i-ésima hélice de uma estaca helicoidal multi-hélice
A_n	Área efetiva da hélice superior de uma estaca helicoidal multi-hélice
A_s	Área da seção transversal da haste central
c	Coesão do solo
C	Carregamento de compressão
C_a	Adesão ao longo das hastes de extensão
c_u	Coesão última do solo
COV	Coefficiente de variação
D	Diâmetro de hélice de uma estaca helicoidal
D_1	Diâmetro da última hélice de uma estaca helicoidal (hélice do topo, mais próxima a superfície do terreno)
D_{50}	Diâmetro médio dos grãos do solo
D_a	Diâmetro médio das hélices de uma estaca multi-hélice
D_s	Diâmetro da haste central
E	Módulo de elasticidade do aço
e	Índice de vazios do solo
FMK_t	Fator de melhoria em termos de fator torque
FMQ_u	Fator de melhoria em termos de carga última convencional
$FM\delta$	Fator de melhoria em termos de deslocamento
f_s	Atrito lateral do ensaio de cone

H_1	Profundidade da última hélice de uma estaca helicoidal (hélice do topo, mais próxima a superfície do terreno)
$(H_1/D_1)_{cr}$	Profundidade relativa crítica da hélice superior
H_a	Profundidade média do cilindro de solo no método da ruptura cilíndrica
H_n	Profundidade da n-ésima hélice
hp	<i>Horse power</i>
K_t	Fator torque
K_u	Coeficiente de empuxo na ruptura
L	Comprimento da haste central, comprimento da estaca
lbf.ft	Libra-força vezes pé
LS	Profundidade de instalação do obturador
N_{60}	Índice de resistência à penetração relativo a um equipamento com 60% eficiência.
N_{72}	Índice de resistência à penetração relativo a um equipamento com 72% eficiência.
N_c	Fator de capacidade de carga relativo a parcela de coesão
N_q, N_{qu}	Fator de capacidade de carga relativo a parcela de sobrecarga
N_{SPT}	Índice de resistência à penetração do solo
P	Carregamento aplicado
p_s	Perímetro da haste central
P_{UT}	Carga de ruptura geotécnica à tração de uma estaca
P_{UC}	Carga de ruptura geotécnica à compressão de uma estaca
q	Tensão de sobrecarga efetiva vertical
Q_a	Carga admissível de uma estaca helicoidal, que atende ao critério de serviço
q_c	Resistencia de ponta do cone
Q_U	Capacidade de carga, carga última convencional
q_{ult}	Tensão de ruptura do solo

$Q_{ult,i}$	Tensão de ruptura do solo mobilizada pela i -ésima hélice de uma estaca helicoidal
R_f	Razão de atrito do cone no ensaio de cone
rpm	Rotação por minuto
T	Torque de instalação, carregamento de tração
T_M	Torque final médio de instalação relativo ao último metro de instalação
V_{inj}	Volume injetado medido em sacos de cimento de 50 kg
Y	Abertura de pernas de torre autoportante
γ'	Peso específico submerso do solo
Δ	Deslocamento devido à deformação elástica da haste adicionado de 8% do diâmetro da maior hélice de uma estaca para um carregamento aplicado
δ	Deslocamento
δ_a	Deslocamento admissível
σ_v	Tensão efetiva vertical
ϕ	Ângulo de atrito do solo, diâmetro de tubo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	28
2. OBJETIVOS	33
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.1. ESTACAS HELICOIDAIS	34
3.1.1. Breve Histórico.....	34
3.1.2. Características Básicas	35
3.1.3. Vantagens	38
3.2. SOLOS TROPICAIS	44
3.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÃO POR ESTACAS HELICOIDAIS.....	46
3.3.1. Método de ruptura cilíndrica.....	48
3.3.2. Método de capacidades individuais	51
3.4. INFLUÊNCIA DA INSTALAÇÃO E ESPAÇAMENTO ENTRE HÉLICES.....	53
3.4.1. Espaçamento entre hélices e o mecanismo de ruptura.....	55
3.4.2. Modo de ruptura <i>versus</i> profundidade relativa	57
3.5. INJEÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO	59
3.5.1. Fraturamento hidráulico.....	60
3.5.2. Compactação	61
3.5.3. Permeação	62

3.5.4. Substituição	63
3.6. INJEÇÕES EM ESTACAS HELICOIDAIS	64
4. MATERIAIS E MÉTODOS	70
4.1. INSTALAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS ENSAIADAS.....	71
4.2. PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO.....	75
4.2.1. Vedações	78
4.2.2. Obturador inflável	79
4.3. PROVAS DE CARGA.....	82
4.4. ENSAIOS ÁREA 1	88
4.5. ENSAIOS ÁREA 2	91
4.6. ENSAIOS ÁREA 3	94
4.7. ENSAIOS ÁREA 4	100
5. RESULTADOS E ANÁLISES	104
5.1. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 1	104
5.2. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 2	107
5.2.1. Primeira campanha	107
5.2.2. Segunda campanha	113
5.3. PROVAS DE CARGA E EXUMAÇÃO REALIZADAS NA ÁREA 3	116
5.3.1. Exumação das estacas	124
5.4. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 4	130
5.5. ANÁLISE DOS GANHOS EM TERMOS DE CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO.....	136

5.5.1. Melhoria <i>versus</i> resistência do maciço.....	140
5.5.2. Melhoria <i>versus</i> volume injetado	141
5.6. ANÁLISE DOS GANHOS EM TERMOS DE REDUÇÃO DE DESLOCAMENTO.....	144
5.7. ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO DAS ESTACAS HELICOIDAIS INJETADAS	148
6. CONCLUSÕES	155
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
ANEXO A – VALORES DE N_q, N_c e C_α.....	170

1. INTRODUÇÃO

A principal fonte da matriz energética nacional é a hidroelétrica (EPE, 2018). Entretanto, como as unidades geradoras encontram-se distantes dos centros consumidores, são necessárias extensas linhas de transmissão (LT's) para escoamento da energia produzida e implementação das estratégias de integração das diferentes fontes de geração. De acordo com o ONS (2019a), em 2017 o Sistema Interligado Nacional (SIN) possuía em torno de 141.400 km de LT's, como expansão planejada de mais 55.000 km, previstos para entrarem em operação até 2027 (EPE, 2018). A Figura 1.1 apresenta uma visão geral do SIN.

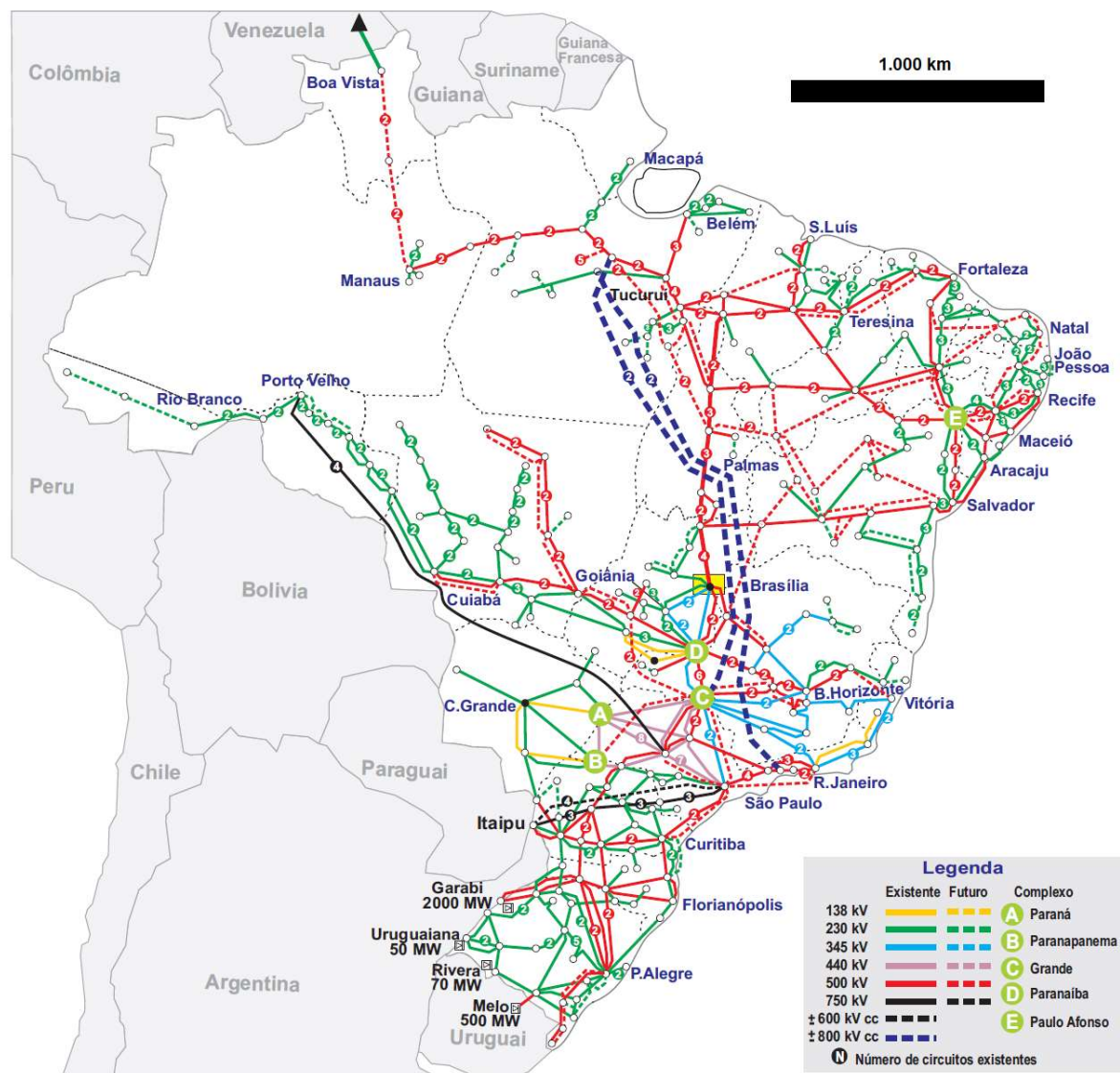


Figura 1.1: Visão Geral do SIN (ONS, 2019b).

As grandes extensões das linhas de transmissão implicam na necessidade de soluções para as fundações das torres frente aos mais diversos cenários geotécnicos. Além disso, as torres são geralmente locadas distantes das fontes de recursos e para acessá-las, frequentemente, é preciso percorrer dezenas de quilômetros de estradas não pavimentadas, cuja trafegabilidade está sujeita ao clima, o que dificulta o transporte dos materiais de construção e a mobilização de equipamentos. A construção de LT's no Brasil é um desafio logístico, além de tudo.

Neste cenário, as estacas helicoidais têm sido bastante utilizadas como fundações de torres, principalmente por: (i) suportar esforços de tração e compressão, (ii) ser instalada por equipamento de grande mobilidade (geralmente retroescavadeiras 4x4), (iii) ser composta por peças pequenas (facilidade de transporte), (iv) necessitar de equipes pequenas (menos custo com logística de pessoal e menores índices de H/h improdutivas), (v) capacidade de carga pode ser avaliada por meio da medida do torque final de instalação (controle da qualidade da fundação), (v) pode ser aplicada abaixo do N.A., (vi) pode ser instalada inclinada, (vii) dispensa completa ou redução significativa no volume de concreto e área de formas, (viii) pode ser carregada imediatamente após o término da instalação (aceleração de cronograma físico), etc.

A estaca helicoidal é composta por dois elementos: seção guia (haste central onde são soldadas as hélices com determinado espaçamento) e extensões (hastes lisas, mas que eventualmente podem possuir hélices). A instalação é feita no terreno 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 para desenvolver o torque requerido numa velocidade aceitável, tipicamente entre 5 e 20 rpm (lento implica em baixa produtividade e rápido pode causar maior perturbação). Durante a instalação, o torque aplicado é medido por meio de torquímetro acoplado ao topo da composição. A instalação prossegue até que sejam atingidos o comprimento e o torque mínimos especificados no projeto. No Brasil, a maior frequência dos projetos emprega estacas helicoidais para cargas que, geralmente, não ultrapassam os 450 kN em compressão e os 1.000 kN em tração.

O processo de instalação da estaca helicoidal causa modificações no solo atravessado pelas hélices, o que afeta significativamente suas propriedades mecânicas e conseqüentemente a capacidade de carga à tração da fundação (solicitação comum em fundações de torres linhas de transmissão devido à ação de ventos). Em trabalhos anteriores, este efeito foi observado

pela menor carga mobilizada pelas hélices superiores (instaladas em região de solo penetrada um maior número de vezes) e também pela diferença entre valores de capacidade de carga a tração e a compressão, já que se assume que o solo abaixo da hélice da ponta está intacto (TROFIMENKOV e MARIUPOLSKII, 1965; KANAI, 2007; TSUHA et al., 2012; SANTOS FILHO, 2014; LUTENEGGER e TSUHA, 2015). Importante notar que todos os tipos de estacas causam modificações no estado de tensões e nas propriedades dos solos quando são inseridas ou moldadas no solo.

Solos residuais consideravelmente intemperizados são de ocorrência frequente em nosso país. Estes solos quando intactos, por serem estruturados, apresentam grande estabilidade (ALMEIDA et al., 2011). No entanto, a desestruturação do solo causada pela instalação de estacas helicoidais diminui consideravelmente sua resistência e, conseqüentemente, a capacidade de carga à tração da fundação. Uma única passagem das hélices da estaca pode ser suficiente para que grande parte de sua resistência inicial seja perdida. Foi observado em um solo residual poroso ($N_{SPT} \sim 7$) e não saturado que a tensão de ruptura do solo quando a estaca (de hélice única) foi carregada em tração se reduziu a apenas 20% da tensão de ruptura quando a estaca foi carregada em compressão (SANTOS FILHO, 2014; LUTENEGGER e TSUHA, 2015; TSUHA et al., 2015). Em contraste, num ensaio de uma estaca de quatro hélices, a relação tração/compressão para um solo residual mais resistente ($N_{SPT} \sim 17$) foi de 70%, indicando que a estaca se comporta mais adequadamente quando as hélices são embutidas em solos mais competentes (LUTENEGGER e TSUHA, 2015).

Onde espessas camadas de solos de baixa capacidade são encontrados, para que a instalação das estacas helicoidais esteja finalizada em solos resistentes (para garantir um bom desempenho da fundação) deve-se atingir grandes profundidades, o que tende a inviabilizar economicamente a sua aplicação. Outro cenário geotécnico onde a aplicação de fundações helicoidais pode demonstrar-se economicamente inviável é quando o perfil consiste de solos de baixa capacidade alternando bruscamente para solos muito resistentes (impenetrável à helicoidal, $N_{SPT} \sim 40$) ou rocha. Como as estacas não penetram em rocha ou solos muito resistentes, uma eventual adequação do projeto a este cenário geotécnico implica necessariamente em aumento do número de elementos do estaqueamento, devido a reduzida capacidade de carga à tração e aos elevados deslocamentos sob carga de tração que seriam apresentados pelas estacas nestas condições.

Um fator que também restringe o uso deste tipo de estaca em solos de baixa capacidade, é o fato de que os deslocamentos admissíveis para fundações de torres autoportantes são menores que os admitidos para ancoragens de estais ou mastros de torres estaiadas (IEC 60826, 2017). Nestes casos, para atender aos critérios de projeto, podem ser tomadas duas medidas: (i) reduzir a carga de projeto das estacas para um dado torque de instalação, o que conduz a um aumento no número de estacas por pé de torre ou (ii) aumentar o torque de instalação, o que acarretará em maiores comprimentos instalados. Entretanto, ressalta-se que devido a possibilidade de ocorrência de perfis geotécnicos desfavoráveis, conforme comentado anteriormente, o máximo torque de instalação possível fica limitado ao desenvolvido nas camadas de baixa resistência, sobrejacentes à rocha ou ao solo muito resistente (impenetrável).

Em perfis de geotécnicos favoráveis à aplicação de fundações helicoidais, utilizando-se o equipamento de instalação padrão (conjunto motoredutor hidráulico acoplado à retroescavadeira de 85 hp), a carga máxima de tração fica limitada a, aproximadamente, 900 kN, devido ao torque máximo proporcionado pelo equipamento. De modo que para obter maiores cargas é necessário um equipamento de maior potência, por exemplo, uma escavadeira hidráulica. Entretanto, esta alteração no equipamento de instalação implicará em aumento dos custos de instalação e perda de produtividade devido ao maior custo associado ao equipamento e a menor mobilidade deste. Neste caso, a viabilidade econômica desta solução deve ser verificada frente a possibilidade de associar mais estacas de menor capacidade, para a qual são necessárias peças adicionais para interligação.

Neste sentido, visando ampliar as possibilidades de aplicação econômica de estacas helicoidais, esta tese teve por objetivo analisar o comportamento de fundações helicoidais submetidas a um procedimento de injeção de calda de cimento. A técnica desenvolvida e aplicada consiste na injeção de calda de cimento pelo interior das hastes tubulares da estaca, ao final da instalação, para melhoria das propriedades do solo na região das hélices e, conseqüentemente, do sistema estaca-solo.

Para poder avaliar o efeito da injeção de calda de cimento na performance da fundação por estacas helicoidais, foram inicialmente desenvolvidos os acessórios para vedação das emendas dos componentes da estaca e um procedimento para execução da injeção

propriamente dita, de forma a possibilitar confiabilidade e repetibilidade do processo. De forma inédita, foi também desenvolvido e utilizado um dispositivo denominado obturador inflável. Desta forma, o mesmo procedimento de injeção foi realizado nas diversas estacas ensaiadas, sendo as estacas configuradas para injeção em dois modos distintos: (i) injeção livre, ou seja, sem obturador inflável e (ii) injeção com obturador inflável inserido na composição.

No âmbito deste trabalho, foram realizadas 49 provas de carga à tração e à compressão em estacas convencionais e injetadas, distribuídas em quatro locais distintos: (1) campo de testes da Vercon/Vértice, em Betim/MG; (2) Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), em Itirapina/SP; (3) Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), em São Carlos/SP e (4) obra de linha de transmissão, em Barreirinhas/MA. Nos terrenos 1, 2 e 3 apenas foram realizadas provas de carga à tração, visto que o solo perturbado pela instalação que é solicitado nesta condição. Para avaliar se o procedimento de injeção também melhora o comportamento da fundação solicitada à compressão, no terreno 4 foram testadas estacas sob este tipo de carregamento.

No final deste trabalho, os resultados obtidos são analisados conjuntamente para apuração das tendências dos ganhos (em termos de capacidade de carga e deslocamento) obtidos no processo sendo consideradas as variáveis: torque de instalação, volume injetado, número de hélices da estaca e presença de obturador inflável na composição. Também, são apresentados valores de fatores de capacidade de carga e de intercepto coesivo, obtidos por meio da retroanálise das provas de carga, para uma estimativa inicial da capacidade de carga à tração de estacas helicoidais com injeção de calda de cimento, que podem ser usados como valores orientativos para condições de solo similares.

O emprego da injeção estaria indicado principalmente para locais em que, por questões técnicas ou econômicas, seja necessário instalar as hélices das estacas em solo de baixa resistência ou ainda onde se tenha interesse em reduzir os deslocamentos em serviço. A injeção deve atuar como um agente recuperador dos efeitos da instalação da estaca no solo. Por outro lado, os ganhos proporcionados pela injeção possibilitam que estacas de maior capacidade de carga sejam executadas utilizando-se um mesmo equipamento de instalação.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo principal conhecer o comportamento carga *versus* deslocamento de estacas metálicas helicoidais melhoradas por meio de injeção de calda de cimento.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um procedimento padronizado para injeção de calda de cimento em estacas helicoidais e os acessórios necessários para vedação das emendas dos componentes;
- Analisar o efeito do número de hélices da estaca na melhoria proporcionada pela injeção no comportamento da fundação;
- Analisar a resposta do melhoramento proporcionado pela injeção em solos de diferentes características (três terrenos de solo residual de diferentes origens e um terreno de solo sedimentar arenoso);
- Identificar os benefícios da injeção de calda de cimento com a utilização de um obturador inflável, destinado a concentrar a calda injetada na região das hélices. Patente requerida Nº BR 102017012678-1 A2;
- Propor procedimento de cálculo simplificado para estimar a capacidade de carga à tração de fundações por estacas helicoidais melhoradas com injeção de calda de cimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ESTACAS HELICOIDAIS

3.1.1. Breve Histórico

Em 1838, Alexandre Mitchell utilizou as estacas helicoidais na fundação do Farol de Maplin Sands (Figura 3.1), construído no Rio Tamisa, na Inglaterra. As hastes das primeiras estacas eram confeccionadas de ferro fundido ou madeira com hélices de ferro fundido (PERKO, 2009).

Segundo Clemence (1985), na década de 1950 ocorreu um desenvolvimento significativo das estacas helicoidais. Este desenvolvimento se deu em conjunto com as novas possibilidades ligadas à engenharia mecânica e metalúrgica. Este tipo de fundação teve seu uso inicialmente na indústria da energia elétrica e telecomunicações, mas devido às suas vantagens (rápida instalação, capacidade de carregamento imediato e resistência a tração e compressão), nos últimos vinte anos passaram a ser utilizadas como ancoragens em diversas aplicações, 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 baseado em regras empíricas e recomendações de fabricantes (TSUHA, 2007).

Clemence e Lutenegger (2015) citam que ocorreu um crescimento exponencial no uso de estacas helicoidais nos últimos 25 anos. Este crescimento tem sido marcante na América do Norte, onde concentram-se a maioria das empresas executoras deste tipo de fundação. No entanto, o uso desta estaca também tem sido ampliado em outros países. Kanai (2007) comenta que na década de 80 diversos modelos de estacas helicoidais foram desenvolvidos no Japão para suportar vários tipos de estruturas. No Brasil, os primeiros registros de uso desta estaca em projetos de transmissão de energia datam do final da década de 1990, tendo crescido sido significativo nos últimos 10 anos.

Mais recentemente, a utilização de estacas helicoidais tem sido sugerida como uma solução inovadora e atraente para as fundações de turbinas eólicas offshore na Europa (SPAGNOLI e

GAVIN, 2015; BYRNE e HOULSBY, 2015; SPAGNOLI et al., 2015). Do mesmo modo, estudos que visam a aplicação de estacas helicoidais em estruturas offshore têm sido realizados na Austrália (ZHAO et al., 2015).



Figura 3.1: Farol de Maplin Sands (PERKO, 2009).

3.1.2. Características Básicas

A estaca helicoidal é um elemento estrutural de fundação constituído por uma haste central onde são soldadas placas helicoidais, com determinados espaçamentos entre elas. O diâmetro das hélices varia tipicamente de duas a quatro vezes o diâmetro da haste (KURIAN e SHAH, 2009). O número e diâmetro das hélices são definidos de acordo com as características do solo e capacidade de carga desejada (TSUHA, 2007). O espaçamento entre as hélices é definido de

forma a se obter a máxima eficiência. A Figura 3.2 apresenta uma série de hélices e o processo de soldagem de uma hélice na haste central de uma estaca.

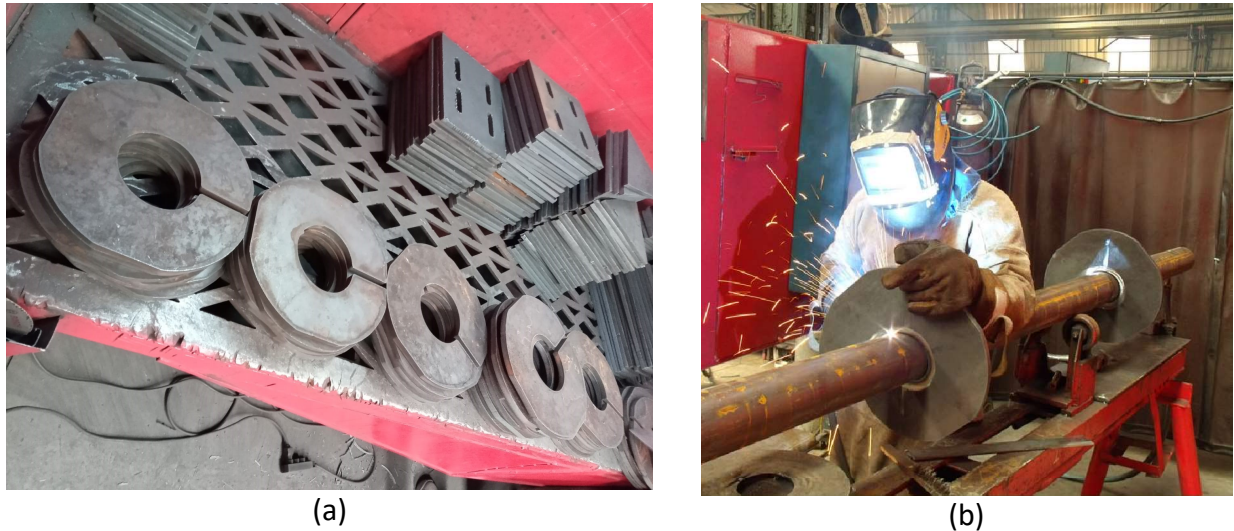


Figura 3.2: (a) Hélices recém conformadas, (b) Soldagem de uma hélice à haste central de uma estaca.

Os componentes básicos de uma estaca helicoidal são: seção guia e extensões. A seção guia é a primeira seção instalada no terreno, é nela estão fixadas as hélices. As extensões são hastes lisas (sem hélices) ou com hélices com sistema de acoplamento tipo ponta e bolsa com parafusos (ou roscas) que são acrescentadas a seção guia para que ela alcance o solo com resistência requerida em projeto e/ou para aumentar o número de hélices da estaca (PERKO, 2009). A Figura 3.3 apresenta uma ligação entre seções de uma estaca.



Figura 3.3: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal.

A Figura 3.4 apresenta uma seção guia com as denominações de suas características básicas. A haste central pode ter seção circular vazada (tubular) ou quadrada maciça, tendo a função de transferir o torque durante a instalação e o esforço às hélices quando a estaca é carregada. As hélices são fabricadas com passo constante para uma mesma estaca, de forma a causar a menor perturbação possível no solo durante a instalação (CARVALHO, 2007).

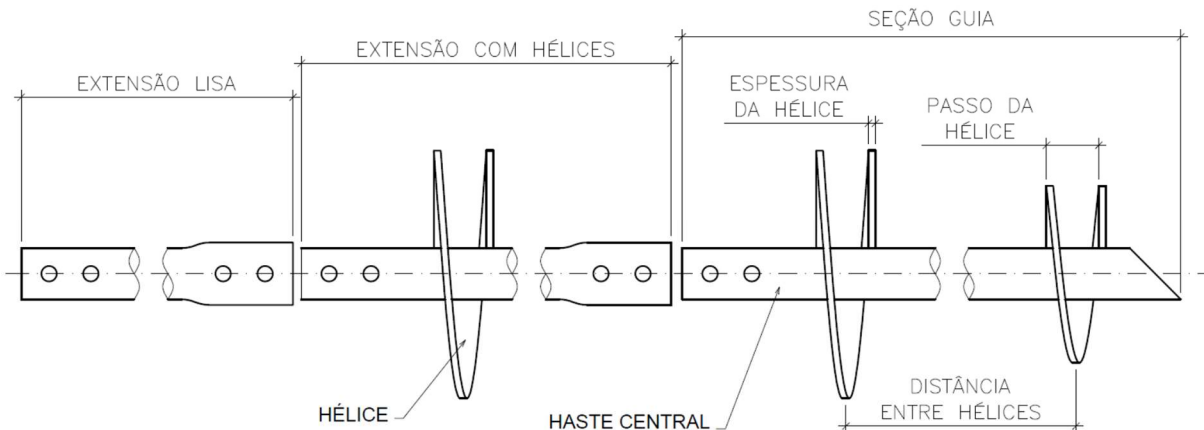


Figura 3.4: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas.

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 cilíndrica (hélices de mesmo diâmetro) ou cônica (com diâmetros crescentes), no sentido da ponta para o topo. Este último modelo, com no mínimo três hélices, é o mais utilizado nas obras para permitir uma melhor aplicabilidade e uniformização do torque de instalação. No entanto, em aplicações para cargas apenas de compressão, pode ser economicamente vantajoso utilizar estacas com apenas uma hélice de grande dimensão.

No Brasil ainda não há norma específica que trate do projeto e da fabricação de estacas helicoidais, existindo apenas uma brochura com recomendações técnicas em elaboração pelo Cigré Brasil. Cada modelo é customizado de acordo com as características e necessidades específicas dos projetos. Tem-se como premissa básica o atendimento à NBR 8800 (2008), em que a resistência de projeto dos elementos estruturais da estaca deve ser superior aos esforços introduzidos durante o processo de instalação e ao carregamento de projeto, levando-se em conta a diminuição das espessuras do tubo e das hélices devido à corrosão,

conforme especificado na NBR 6122 (2019), para os casos de estacas de aço em que não sejam aplicados tratamentos especiais.

A respeito da corrosão, Perko e Rupiper (2000) afirmam que as estacas metálicas helicoidais devem ser protegidas deste processo por meio de métodos apropriados. Desta forma, as estacas helicoidais que são fabricadas em aço carbono comum são galvanizadas. No Brasil, estas estacas costumam ser fabricadas em aço tipo patinável. A principal característica do aço patinável é o desenvolvimento, quando exposto aos agentes corrosivos da atmosfera, de uma película protetora de óxido (denominada pátina) 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).

3.1.3. Vantagens

De acordo com Perko (2009) as principais vantagens das estacas helicoidais são as seguintes, algumas comuns a todas as estacas de deslocamento:

- Podem ser removidas em aplicações temporárias;
- São facilmente transportadas para locais remotos;
- O torque final de instalação é utilizado para verificação da capacidade de carga;
- Instalação em terrenos de nível d'água superficial sem necessidade de rebaixamento;
- Instalação rápida;
- 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;
- Elimina cura de concreto e trabalhos com formas;
- Não produz bota-fora;
- Minimiza perturbações em locais ambientalmente sensíveis.

Devido às vantagens descritas acima, as estacas helicoidais atualmente têm se apresentado frequentemente como a solução de fundação profunda adotada para torres auto-portantes e estaiadas (como fundação do mastro e ancoragem de estai). Isto se deve principalmente ao

controle de capacidade de carga proporcionado pela medida do torque de instalação, alta produtividade, a capacidade destas estacas resistirem a esforços tanto de tração como de compressão, a reduzida mão de obra e a grande mobilidade dos equipamentos de instalação. Por outro lado, como existem poucos fabricantes e instaladores deste tipo de fundação os custos de transporte e mobilização de equipes e equipamentos podem inviabilizar a adoção das estacas helicoidais para obras que demandem pequenos volumes instalados. Ultimamente as fundações helicoidais têm se mostrado como uma boa alternativa para reforço de fundações.

Como em todos os tipos de fundações, nas estacas helicoidais também há restrições de aplicação. Em solos com pedregulhos de dimensões que possam danificar as hélices das estacas, ou muito resistentes a pouca profundidade, nos quais as estacas não conseguem ser instaladas a uma profundidade adequada para resistir aos esforços de tração, as estacas helicoidais não são aplicáveis. Além disso, devem ser tomados cuidados especiais com fundações sujeitas a esforços de tração instaladas em locais inundáveis se instaladas na seca.

Ao longo do ano o solo experimenta variações no teor de umidade natural. Durante o período de estiagem a umidade será significativamente menor do que durante a estação chuvosa. A maior variação de umidade ocorre na superfície do terreno e diminui com a profundidade chegando até uma certa profundidade na qual não se verificam mais variações sazonais. Conforme Day (2006), a esta profundidade dar-se o nome de zona ativa, sendo ela variável de solo para solo devido a vários fatores, tais como: climáticos (precipitação e evapotranspiração), características do solo (permeabilidade, teor de argila e argilomineral) e variáveis de campo (relevo e presença de vegetação). Por este motivo, especial atenção deve ser dispensada às estacas curtas (ou seja, com as hélices na zona ativa) submetidas à tração, instaladas em solos coesivos e na estação seca. Por exemplo, Ferreira e Ferreira (2009) definiram que a zona ativa do seu local de estudo, em Petrolândia-PE, tem 2,5 m. Alguns solos podem apresentar perdas importantes de resistência com a elevação do teor de umidade ou mesmo ter comportamento colapsível (CARVALHO et al., 2015). Ditosamente, estes são casos especiais.

Nestas condições é importante que o programa de investigação geológico-geotécnica que subsidia a elaboração do projeto de fundações contemple ensaios específicos para permitam

avaliar a colapsibilidade do solo da zona ativa. Em qualquer caso, se verificada a necessidade já durante a implantação ou, posteriormente, na operação dos empreendimentos de transmissão, que se implementem as ações mitigatórias relativas ao desenvolvimento de processos erosivos e disciplinamento de águas de escoamento superficial, que são objeto do PBA e PRAD das obras. A proteção das fundações da ação de águas de escoamento superficial é normalmente feita por meio da construção de camalhões de solo-cimento, conforme indicado pela Cemig (2018).

A depender do tipo de solo e da geometria, um valor limite de N_{SPT} para instalação da estaca pode ser obtido através de gráficos de pré-dimensionamento elaborados por fabricantes. Estes gráficos são construídos a partir dos modelos de catálogo e da experiência acumulada pelos fornecedores. São levados em conta a quantidade e diâmetro das hélices das estacas e correlações entre o N_{SPT} (valor médio na posição das hélices) e a capacidade de carga do conjunto de hélices da estaca. Na Figura 3.5 são apresentadas curvas de capacidade de carga de algumas composições de hélices de estacas instaladas em solos coesivos. Na Figura 3.6 são apresentadas curvas para solos não-coesivos. Nota-se que não é feita qualquer menção à haste da estaca.

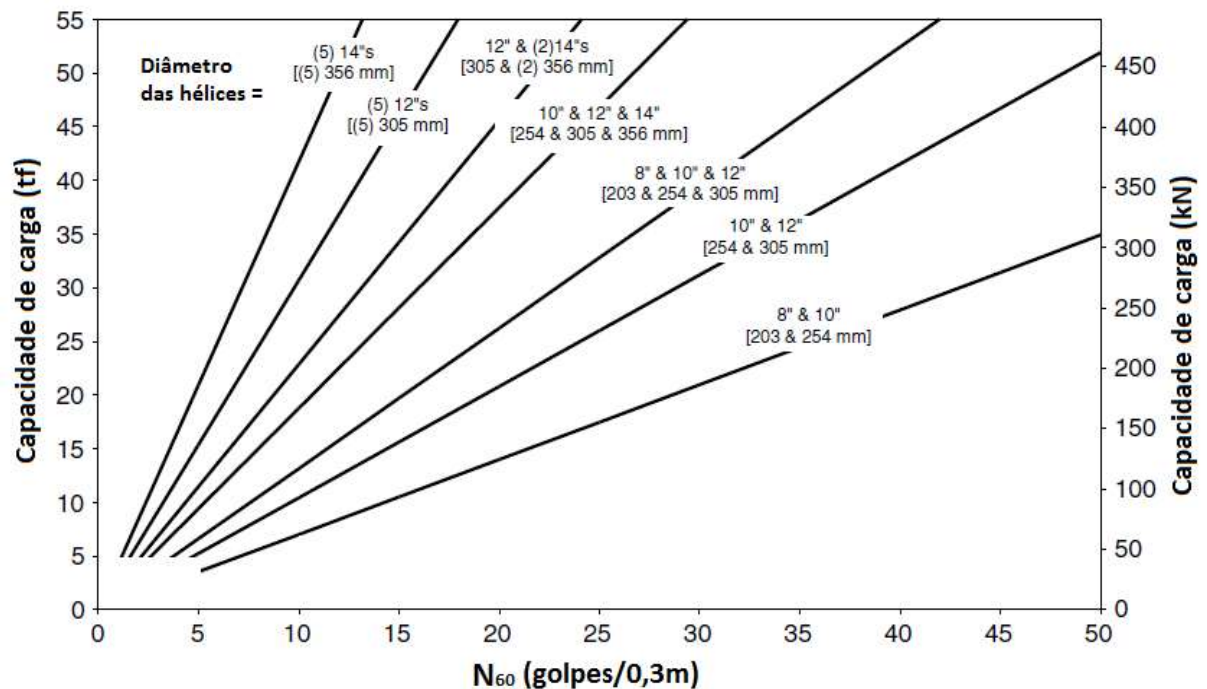


Figura 3.5: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).

Como não é levada em conta a resistência estrutural das hastes aos esforços de torção induzidos durante a instalação, e aos axiais da estaca em serviço, ainda são necessárias verificações adicionais na utilização destes gráficos, inclusive estudo de flambagem, já que os valores de N_{60} referem-se somente a região das hélices.

De acordo com Perko (2009), o estudo de flambagem é necessário quando as estacas comprimidas atravessam espessas camadas de solos moles ou pouco compactos. De acordo com o AC 358 (ICCES, 2012) e IBC (ICC, 2015), os solos que não sejam fluidos (ou seja, com $N_{SPT} \geq 1$) oferecem contenção lateral suficiente para que não ocorra flambagem nas estacas. Já a EN 1997-1 (EUROCODE 7, 2004) afirma que estacas em solos com coesão (resistência não drenada) maiores que 10 kPa não requerem verificação de flambagem. Stephenson (2003) comenta que estacas helicoidais isoladas 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, como proposto por Vickars and Clemence (2000), pode torná-la capaz de resistir a estes esforços e eliminar a possibilidade de flambagem. O lançamento de grupos de estacas adequadamente arranjadas, com estacas instaladas inclinadas, também pode ser uma solução tecnicamente viável e de fácil execução, já que a maioria dos equipamentos permitem que isso seja feito.

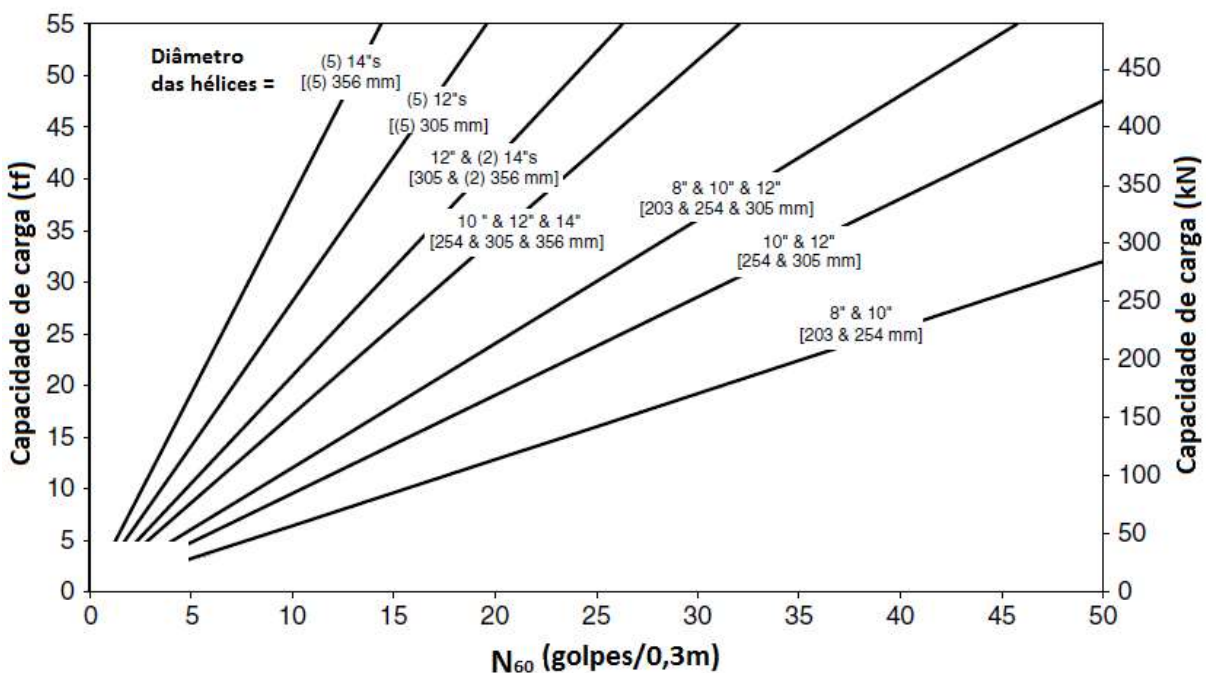


Figura 3.6: Gráfico de dimensionamento de estacas helicoidais em solo não-coesivo (MAGNUM PIERING, INC., 2010).

3.1.4. Instalação

As estacas helicoidais são instaladas no solo pela aplicação de um torque no topo da haste central 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 3.7 apresenta um exemplo de equipamento de instalação de estacas helicoidais.

A instalação tem início com a conexão da seção guia ao motor hidráulico utilizando um cabeçote de acoplamento e pinos. 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 contínua, a uma velocidade não superior a 30 rpm (PERKO, 2009). Por outro lado, a A. B. Chance Co. (2010), recomenda que a velocidade de rotação seja da ordem de 5 a 20 rpm.



Figura 3.7: Equipamento de instalação de estacas helicoidais.

Durante a rotação da estaca uma pequena força axial constante deve ser aplicada para manter o avanço da estaca no terreno o mais próximo possível de um passo por rotação. Força insuficiente, ou tração, pode resultar em avanço muito menor que o passo e provocar efeito de tradagem, o que pode afetar significativamente a capacidade de carga da fundação, devido a maior perturbação no solo (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 (A.B. CHANCE CO., 2002). O torque necessário para a instalação é monitorado através de um torquímetro acoplado à estaca (Figura 3.8).

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 a tração de uma fundação em estaca helicoidal (Q_U) pode ser correlacionada, empiricamente, com o torque final de instalação (T) por meio de uma relação linear (Equação 1). A Tabela 3.1 apresenta alguns valores de fator torque (K_t), que variam de acordo com o diâmetro da haste central da estaca. Entretanto, os fatores torque apresentados na tabela devem ser considerados como preliminares, sendo necessário confirmar e, eventualmente, ajustar o valor adotado no projeto por meio da realização de instalação e prova de carga em estacas com a composição definida no projeto onde se deve verificar se o deslocamento da fundação atende ao estado limite de serviço (ELS), que, por sua vez é um requisito das estruturas.

$$Q_U = K_t \cdot T \quad (1)$$

Tabela 3.1: Valores de K_t de acordo com AC 358 (ICCES, 2012)

Diâmetro externo (mm)	K_t (m^{-1})
38 a 45	32,8
73	29,5
76	26,2
89	23,0

O 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 ou prossegue-se por mais um metro, para confirmação, a depender da instrução técnica que fundamente o procedimento de instalação. Este procedimento de controle de execução de estacas helicoidais é equivalente ao registro de nega e repique em estacas cravadas. A verificação do torque definido em projeto durante a instalação é um método de controle que pode, em certos casos, servir como forma de previsão da capacidade de carga da estaca.

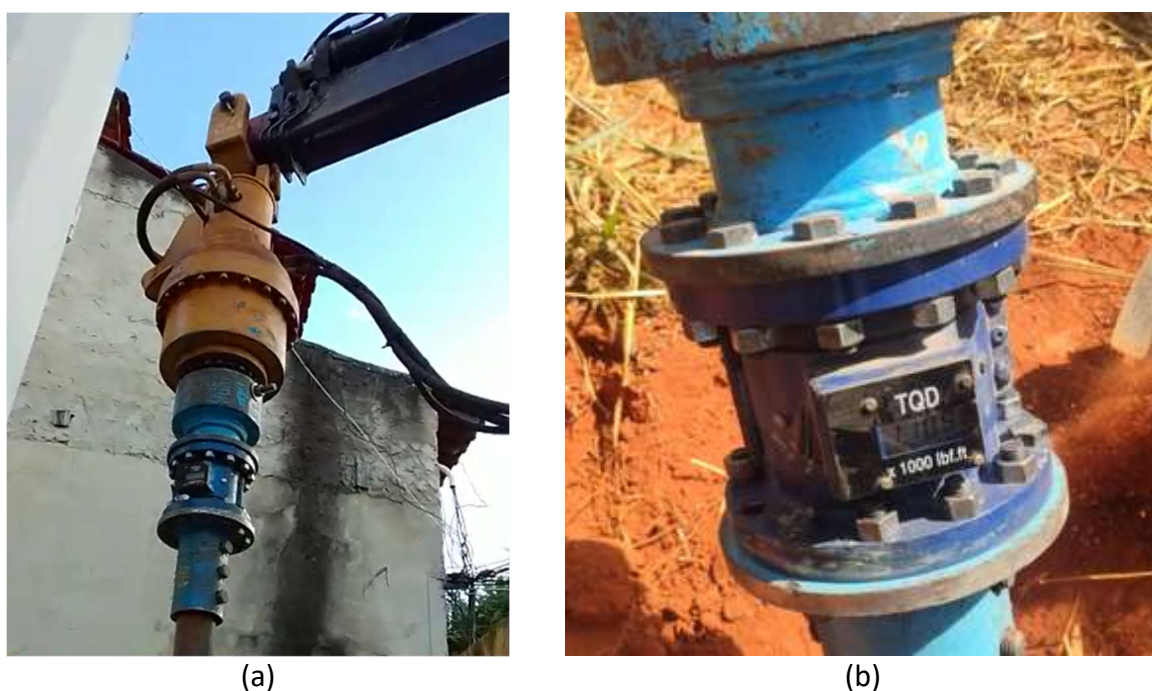


Figura 3.8: (a) Torquímetro para acompanhamento da instalação e (b) detalhe do torquímetro.

3.2. SOLOS TROPICAIS

De acordo com Little (1969) e Vaughan (1985), os solos residuais 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 lateríticos cobrem aproximadamente 70% do seu território nacional (MELFI, 1994; MEDINA, 1997 e TOLEDO et al., 2000). A Figura 3.9 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 3.9: Regiões de ocorrência de solos lateríticos no Brasil (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

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 caulínicos e óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. Almeida et al. (2011) afirmam que a cimentação causada por estes óxidos e a sucção (em solos não saturados) 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 com o mesmo grau de compactação. Uma redução significativa é percebida, principalmente, na coesão (GUY e YU, 2008).

A grande porosidade de solos lateríticos justifica sua baixa massa específica 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 terem seu teor de umidade elevado (CINTRA e AOKI, 2009). O fato de o solo ser laterítico deve ser considerado nas previsões de capacidade de carga, 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.

3.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÃO POR ESTACAS HELICOIDAIS

Dependendo do espaçamento entre as hélices e condições do subsolo, a fundação por estaca helicoidal pode apresentar diferentes mecanismos de ruptura, nos quais se baseiam os métodos das capacidades individuais e de ruptura cilíndrica (MERIFIELD, 2011).

Pelo método das capacidades individuais, as hélices de uma estaca são equivalentes a um conjunto de sapatas solicitadas à tração/compressão, de modo que a superfície de ruptura mobilizada acima/abaixo de cada hélice não atinge a hélice superior/inferior. Deste modo, a capacidade de carga à tração aumenta com o número de hélices, pois é o somatório das

capacidades de carga individuais de cada hélice. Neste método, a capacidade de carga de cada hélice é estimada com base na equação da capacidade de carga de Terzaghi (1943), com valores de N_q reduzidos para tração e hélices superiores, devido à perturbação causada pela instalação. No caso de carregamento de compressão, admite-se que o solo abaixo da hélice da ponta seja intacto.

No entanto, tem sido observado em provas de carga que em determinadas situações a capacidade de carga à tração não cresce proporcionalmente ao incremento do número de hélices. Este fato pode ser observado nos estudos de Clemence et. al. (1994), Sakr (2009), Lutenneger (2011) e Tsuha et al. (2012). Kanai (2007) instrumentou e testou fundações por estacas helicoidais multi-hélices, e demonstrou que as hélices mais próximas à ponta mobilizam maiores porcentagens da carga aplicada do que as hélices superiores, proporcionando uma maior contribuição para a capacidade de carga deste tipo de fundação, tanto em tração como em compressão.

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 diminuída.

A Figura 3.10 apresenta as cargas mobilizadas pelas hélices (seção guia em tubo 73 mm de diâmetro externo com quatro hélices de 254 – 305 – 356 – 356 mm de diâmetro espaçadas de três vezes o diâmetro) e a resistência por atrito lateral mobilizado nas hastes de extensões (tubo de 101,6 mm de diâmetro externo com 9,25 m de comprimento) em prova de carga à tração. O torque final médio de instalação foi de 13,29 kN.m estando a estaca instalada em silte arenoso com N.A. É possível notar que no deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio das hélices a resistência por atrito lateral nas hastes representa 10% da carga total mobilizada, não sendo superior a 13% para os deslocamentos maiores que 20 mm. Ressalta-se que o ensaio foi levado a deslocamento da ordem de 25% do diâmetro médio das hélices e a estaca continua mobilizando carga não sendo a ruptura (P_{UT}), caracterizada pelo deslocamento contínuo sem acréscimo de carga, caracterizada para este nível de

deslocamento. A curva carga *versus* deslocamento sequer indica alguma tendência de clara perda de rigidez, que precede a ruptura.

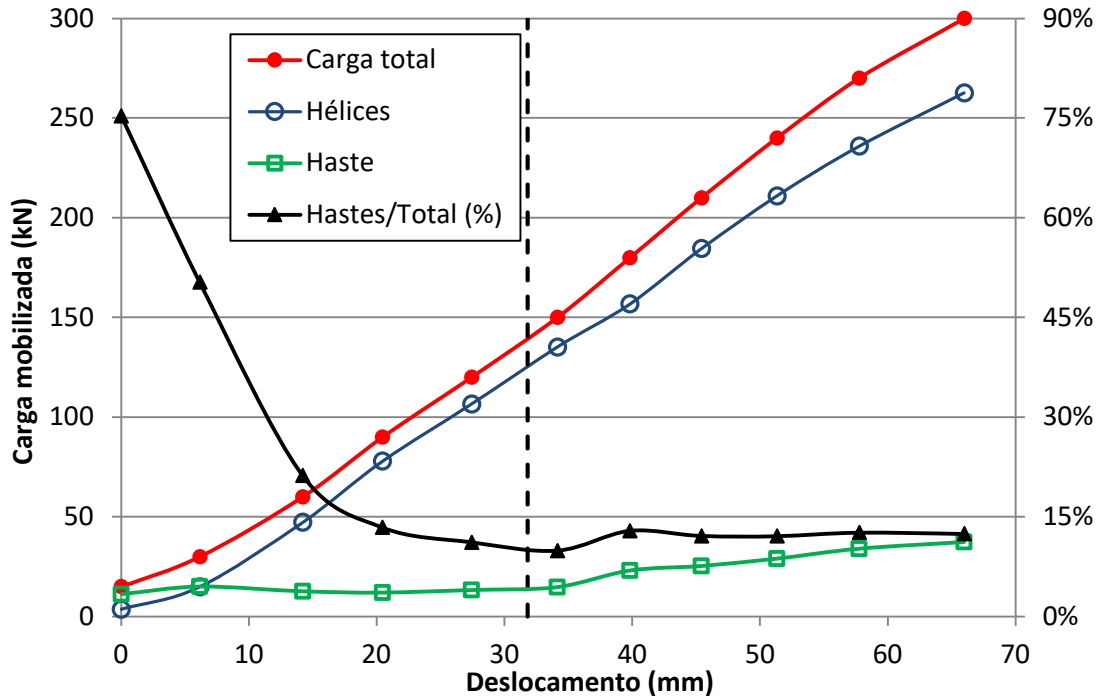


Figura 3.10: Cargas mobilizadas pelas hélices e pelas hastes (atrito lateral) em prova de carga à tração de estaca helicoidal multi-hélice, ensaio IN2 (adaptado de SANTOS FILHO, 2014).

3.3.1. Método de ruptura cilíndrica

Mitsch e Clemence (1985) apresentaram pela primeira vez o uso de um modelo de previsão de carga de ruptura à tração de fundações por estacas helicoidais multi-hélice com base em um mecanismo de ruptura cilíndrica. No método de ruptura cilíndrica, assume-se que a resistência ao cisalhamento do volume cilíndrico de solo entre as hélices é mobilizada. Importante notar que o método não faz referência ao deslocamento necessário para mobilização da carga de ruptura avaliada.

A Figura 3.11 (a) apresenta a distribuição de forças e tensões idealizada em uma fundação por estaca helicoidal de n hélices carregadas em compressão pelo método da ruptura cilíndrica. Admite-se que na compressão é mobilizada a resistência do solo abaixo da hélice da ponta e de cisalhamento da superfície cilíndrica formada pelo solo entre as hélices, além do atrito lateral nas hastes acima da hélice superior.

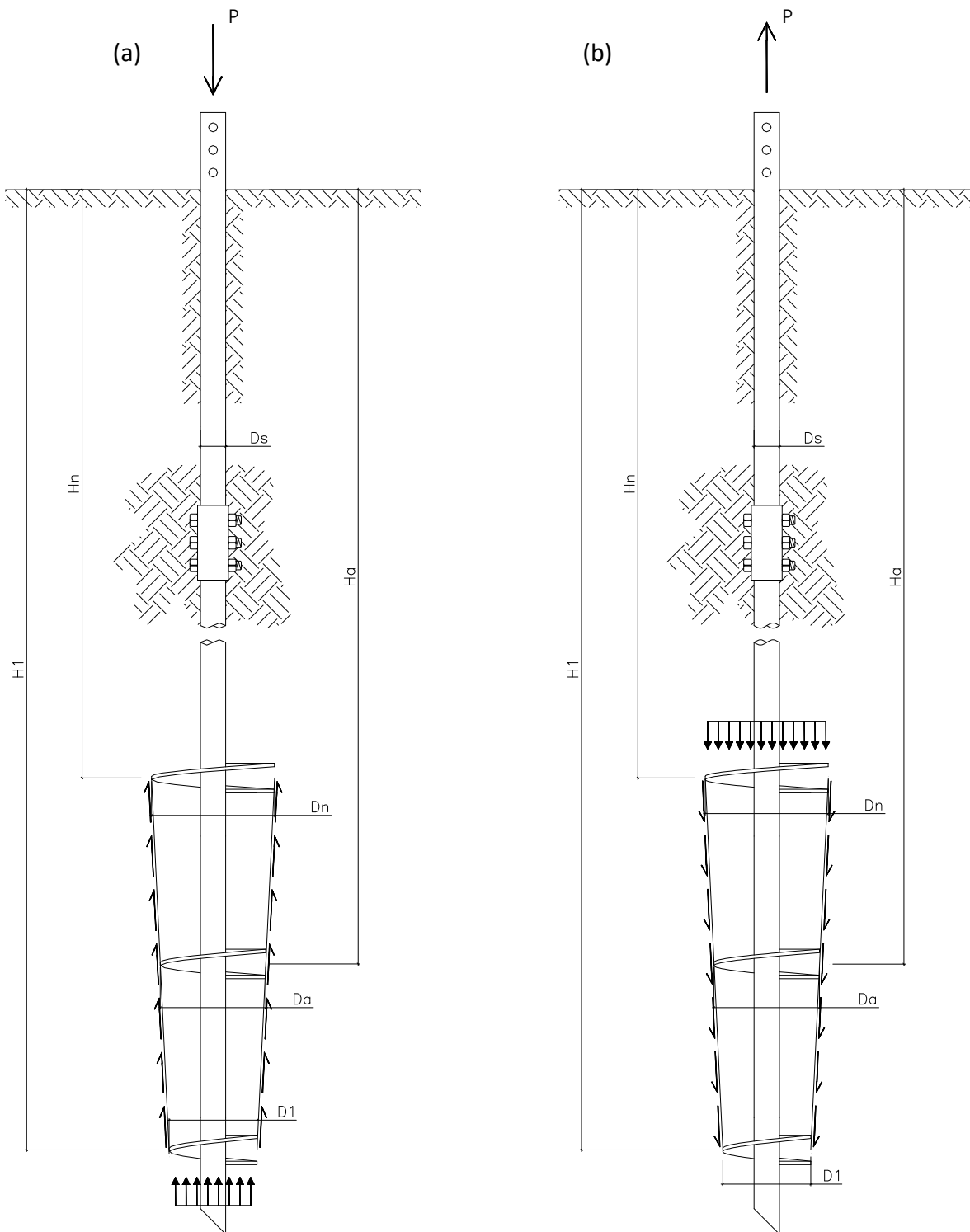


Figura 3.11: Parcelas de resistência mobilizadas em uma fundação por estaca helicoidal submetida à (a) compressão e (b) à tração, pelo método da ruptura cilíndrica (adaptado de PERKO, 2009).

No caso da estaca solicitada à tração (Figura 3.11 (b)), a hélice superior mobiliza a resistência do solo acima dela. Neste caso, a área da hélice é computada descontando-se a área da seção da haste central (área líquida), e os parâmetros de resistência são relativos ao solo acima da

hélice superior (A. B. CHANCE CO., 2002). Se a estaca possuir apenas uma ou duas hélices espaçadas de mais de três vezes o diâmetro o mecanismo muda e, neste caso, a ruptura ocorrerá individualmente, conforme o mecanismo considerado no método das capacidades individuais (LUTENNEGER, 2011). Notar que os métodos não fazem referência ao deslocamento necessário para mobilização da carga de ruptura avaliada.

A carga de ruptura à tração de estacas helicoidais pode ser calculada usando-se o método da ruptura cilíndrica pelas Equações 2, 3 e 4. A Equação 2 é para estacas helicoidais em areia (MITSCH e CLEMENCE, 1985), e as Equações 3 e 4 são para estacas em argila e em silte (MOONEY et al., 1985).

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

$$P_{UT} = A_n c N_c + \pi D_a c (H_n - H_1) + p_s H_n C_a \quad (3)$$

$$P_{UT} = N_q \gamma' H_n A_n + A_n c N_c + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_n^2 - H_1^2) K_u \tan \phi + p_s H_n \left(\frac{\gamma' H_n}{2} \right) K_u \tan \phi + p_s H_n C_a \quad (4)$$

onde:

K_u = coeficiente de empuxo na ruptura (Tabela 3.2);

A_n = área líquida 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 2 a 4 também podem ser usadas para calcular a carga de ruptura à compressão das estacas helicoidais. A diferença está que no caso de compressão, a hélice inferior mais a ponta da haste é 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, sem considerar o efeito da instalação.

3.3.2. 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 carga de ruptura da estaca é dada pelo somatório das capacidades individuais (Equação 5). No caso de compressão o solo mobilizado é aquele abaixo das hélices (Figura 3.12 (a)). A Figura 3.12 (b) ilustra este método para o caso de tração.

$$P_{UT} = \sum_{i=1}^n q_{ult,i} \cdot A_i \quad (5)$$

onde:

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

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

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

A A. B. Chance Co. (2002) recomenda este método para o cálculo da capacidade de carga 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 em sua experiência, a A. B. Chance Co. (2002) afirma que um espaçamento de três diâmetros é suficiente para que a consideração seja válida. Os resultados obtidos por Lutenegger (2011) corroboram esta afirmação.

A Figura 3.12 (a) apresenta a distribuição de forças e tensões mobilizadas em uma fundação por 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 6).

$$q_{ult} = 9c + \bar{q}N_q \quad (6)$$

onde:

c : coesão do solo;

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

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

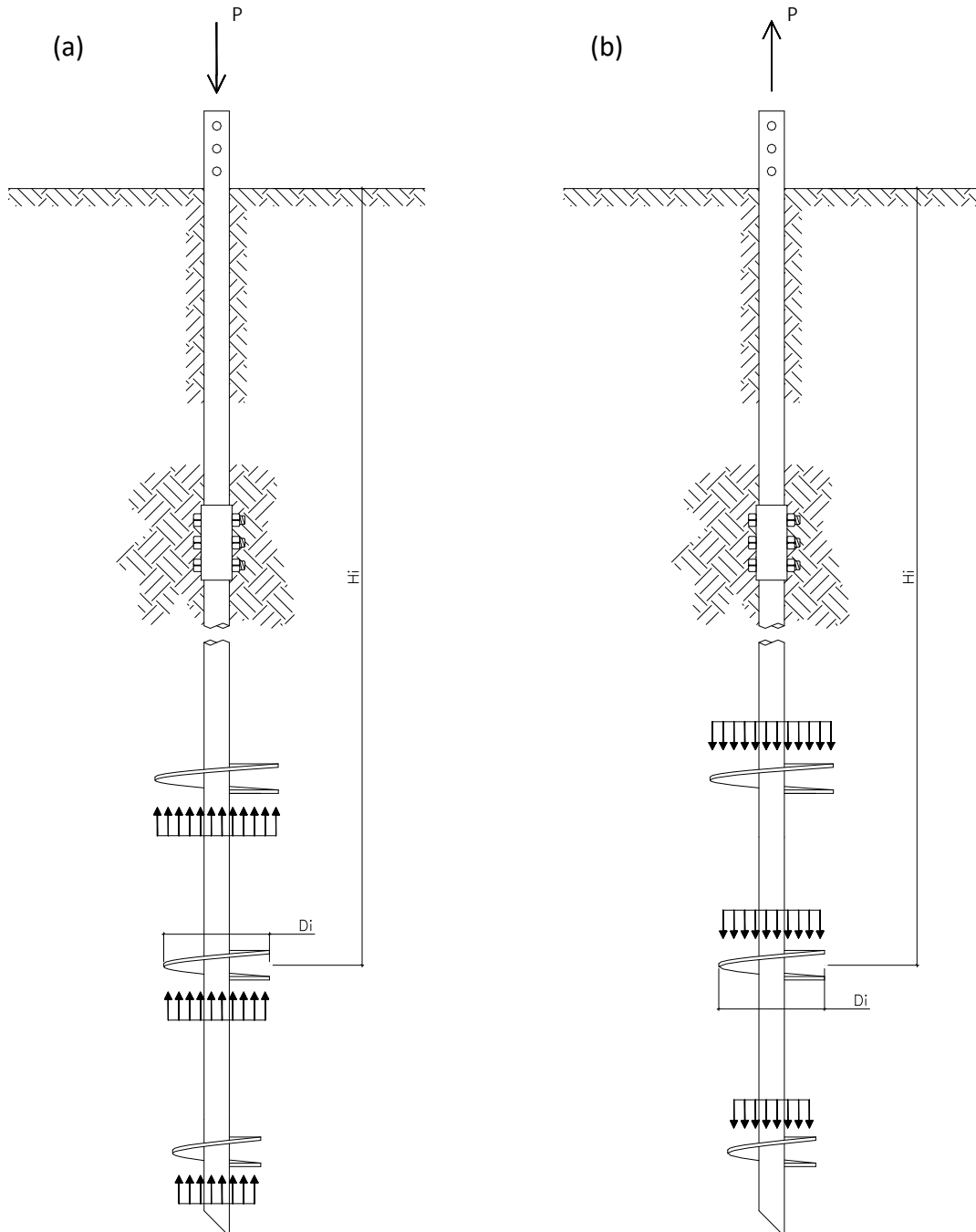


Figura 3.12: Parcelas de resistência mobilizadas em uma fundação por estaca helicoidal submetida a (a) compressão e (b) tração, pelo o método das capacidades individuais (Adaptado de PERKO, 2009).

As mesmas considerações feitas para o método da ruptura cilíndrica sobre negligenciar a resistência por atrito ou adesão ao longo das hastes podem ser assumidas para o método das

capacidades individuais. Para o método das capacidades de carga individuais, a A. B. Chance Co. (2002) recomenda redução de 50% do fator de capacidade de carga N_q , conforme apresentado na fórmula.

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

A carga de ruptura a tração de estacas helicoidais pode ser determinada por meio de procedimento similar ao já apresentado para carregamentos de compressão, desde que as hélices das estacas estejam suficientemente embutidas a uma profundidade tal que ocorra uma ruptura considerada profunda (A. B. CHANCE Co., 2002; PERKO e RUIPER., 2000). A ruptura de uma estaca helicoidal submetida a tração é considerada profunda quando a zona mobilizada na ruptura não se propaga à superfície do terreno. A profundidade de embutimento mínima necessária para que a ruptura seja considerada profunda é apresentada na seção 3.4.2.

3.4. INFLUÊNCIA DA INSTALAÇÃO E ESPAÇAMENTO ENTRE HÉLICES

O processo de instalação de estacas helicoidais causa modificações no solo penetrado pelas hélices. Estas modificações vão desde alterações nas tensões horizontais (confinantes) em solos arenosos (CLEMENCE e PEPE, 1984), geração de excessos de poro-pressão (VYAZMENSKY, 2005) e amolgamento de solos finos (WEECH, 2002). Por esta razão, têm sido sugeridas reduções de alguns parâmetros do solo assumidos no dimensionamento deste tipo de fundação por meio dos métodos frequentemente usados em projetos de ancoragens helicoidais (TSUHA et al., 2012), afim de considerar o efeito da perturbação causada pela instalação na capacidade de carga.

De acordo com Kulhawy (1985), significativa modificação ocorre no interior da zona cilíndrica penetrada durante a 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 na ruptura (K_u) apresentados na Tabela 3.2, para estacas helicoidais em areia.

Tabela 3.2: 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

O mecanismo de penetração de estacas helicoidais tem sido investigado no Japão através de vários modelos de análise (KANAI, 2007). A Figura 3.13 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. Observações do perfil de solo alterado e medidas do empuxo de terra sustentam esta tendência. Neste experimento foi utilizado grão de arroz para modelar o solo (TSUCHIYA et al., 2007).

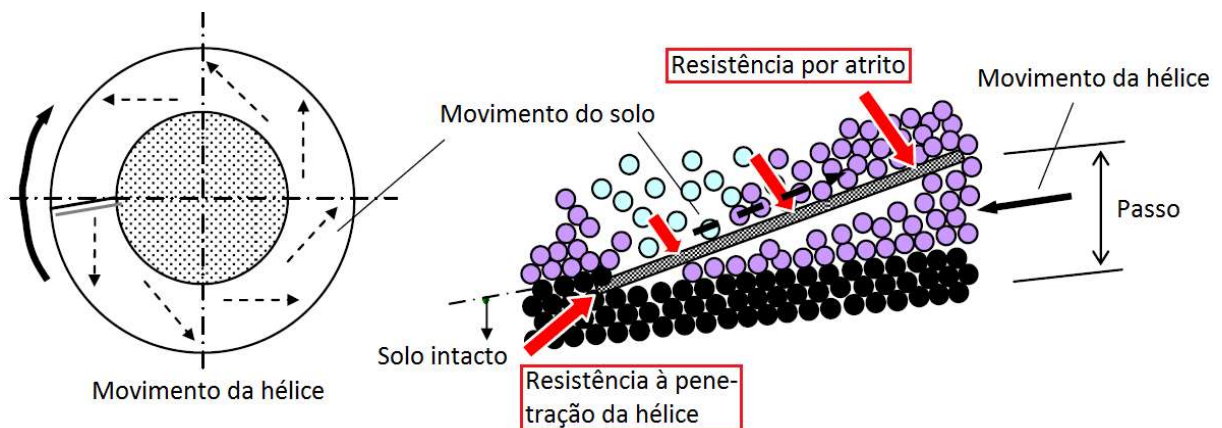


Figura 3.13: Mecanismo de penetração de uma hélice (adaptado de KANAI, 2007).

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 como estacas de deslocamento, tais como as estacas cravadas, observando-se as características básicas de penetração. Mas, 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 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 influencia consideravelmente a capacidade de carga à tração destas estacas. Evidentemente, o comportamento avaliado na prova de carga é o produto de todo esse processo de alteração nas propriedades do solo, prevalecendo o seu resultado sobre qualquer outro avaliado por meio de método teórico ou semi-empírico. O resultado do ensaio também traz consigo a influência do modo ou do mecanismo de ruptura no comportamento da fundação. Sempre que possível, os ensaios devem ser levados até que se caracterize a ruptura geotécnica nítida das estacas.

3.4.1. Espaçamento entre hélices e o mecanismo 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. O espaçamento entre hélices condiciona a forma de ruptura de acordo com os métodos de previsão de capacidade de carga (ruptura cilíndrica e capacidades individuais) (Figura 3.14).

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.

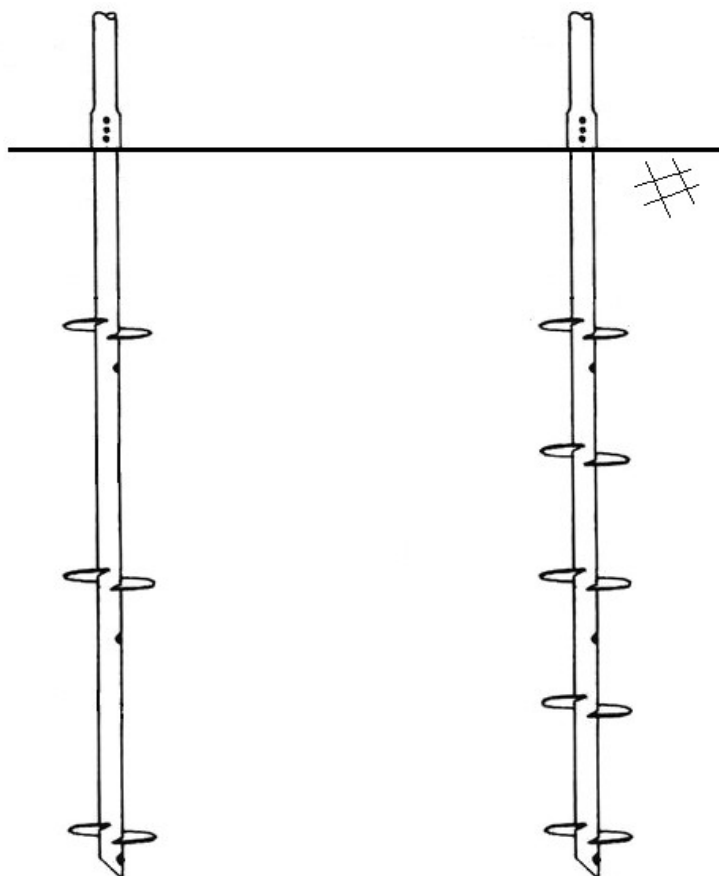


Figura 3.14: Estacas com diferentes espaçamentos entre hélices que condicionam a forma de ruptura de acordo com os métodos (a) capacidades individuais e (b) cilindro de cisalhamento (Adaptado de VYAZMENSKY, 2005).

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 têm 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 de 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. Logo, de acordo com os trabalhos citados, o espaçamento entre hélices de três diâmetros é suficiente para garantir comportamento individual para qualquer tipo de solo.

As estacas helicoidais usadas no Brasil são fabricadas com o espaçamento entre as hélices igual a três diâmetros da hélice inferior. Importante notar que o torque de instalação é fortemente afetado pela quantidade e diâmetro das hélices, de maneira que estacas de mesma composição de hélices devem apresentar perfis de torque de instalação semelhantes mesmo que os espaçamentos entre hélices sejam bastante diferentes. Desta maneira, haverá alteração no mecanismo de ruptura e, por conseguinte, as capacidades de carga obtidas serão, também, distintas. Capacidades de carga distintas para torques semelhantes implicam em fatores K_t diferentes. Logo, os fatores K_t publicados apenas como função do diâmetro das hastes, como é frequentemente encontrado na literatura, devem ser utilizados com cautela na fase de projeto e, preferencialmente, devem ser validados por meio de prova de carga.

Tendo em vista a eficiência do sistema estaca-solo, uma hélice não poderá ser aproveitada ao máximo em sua função de transferir carga ao solo se estiver disposta no sistema de forma que trabalhe dentro da zona de influência de outra. Logo, a composição de estaca mais eficiente, do ponto de vista da racionalização do uso de material (no caso o aço), é a que dispõe as hélices de forma que todas elas trabalhem individualmente.

3.4.2. Modo de ruptura *versus* profundidade relativa

Mitsch e Clemence (1985) estudaram a superfície de ruptura do solo em torno de ancoragens helicoidais e observaram que para uma pequena profundidade relativa da hélice superior (H_1/D_1) a superfície de ruptura acima desta hélice estende-se 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. Evidentemente, H_1 é medido na vertical, mesmo que a estaca seja instalada em ângulo.

Outras pesquisas a respeito de outros tipos de fundações tracionadas vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1960. Pacheco et al. (2008) apresentam uma ampla revisão acerca dos métodos de cálculo de fundações rasas tracionadas e da transição do modo de ruptura de rasa para profunda. Além disso, fazem recomendações para projetos de fundações de torres de transmissão e trazem uma ampla revisão dos métodos de cálculo disponíveis.

Desta maneira, o modo de ruptura das estacas helicoidais é separado em rasas e profundas, baseado na relação H_1/D_1 . A ruptura é considerada rasa quando atinge a superfície do terreno,

e considerada profunda quando isto não ocorre. O valor limite da razão $H_1/D_1 = (H_1/D_1)_{cr}$, que separa o comportamento das estacas em rasas e profundas, é denominado profundidade crítica. 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 resistência não-drenada (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, no entanto recomenda o valor 5 a ser utilizado nos projetos.

Os projetos são desenvolvidos de forma que todas as estacas tracionadas estejam com comprimentos mínimos instalados correspondentes à ruptura profunda. Esta é a condição onde se atinge a melhor eficiência e, conseqüentemente, melhor relação custo x capacidade de carga. Entretanto, não significa que uma estaca não possa ser instalada em condição de ruptura rasa ou que nesta condição a capacidade de carga requerida não possa ser atingida.

Das (1990) apresenta na Tabela 3.3 a variação da razão crítica com o ângulo de atrito interno do solo. Para solos argilosos a razão crítica é calculada pela Equação 7, onde a resistência não-drenada é dada em kPa (DAS, 1990).

Tabela 3.3: 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

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

Evidentemente, o conceito de modo de ruptura devido à profundidade relativa da hélice mais próxima à superfície do terreno não se aplica a estacas submetidas à compressão, uma vez que o carregamento e a superfície de ruptura são direcionados para baixo.

3.5. INJEÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO

O processo de injeção consiste em forçar um fluido sob pressão para o interior do maciço de solo ou rocha. O fluido pode variar desde uma solução ou suspensão fluida até uma consistência de argamassa, inclusive com agregado inerte. O material injetado endurecerá e se tornará imóvel no interior do maciço algum tempo após a injeção (BROWN, 2001). A intenção é que ocorra o preenchimento de cavidades ou fraturas em maciços terrosos ou rochosos de modo a melhorar suas propriedades mecânicas ou reduzir a sua permeabilidade (MURTHY, 2002).

A utilização de injeções para o tratamento de estruturas foi criada pelo engenheiro civil francês Charles Berigny, que em 1802 utilizou a técnica quando se realizavam reparos nas guias das comportas da eclusa do porto de Dieppe (IYOMASSA, 2000).

De acordo com Brown (2001), as técnicas de injeção de calda de cimento podem ser divididas em quatro categorias, quais sejam: fraturamento hidráulico, compactação, permeação e substituição.

A injeção de calda também é utilizada na execução de tirantes ancorados no terreno, cuja execução é normatizada pela ABNT, em sua NBR 5629 (2018). Nesta aplicação, no caso de tirantes não reinjetável e grampos, a injeção tem três finalidades básicas: recomposição da perfuração, transferência de carga dos elementos resistentes à tração (por meio de aderência calda-aço e calda-solo) ao maciço de solo/rocha e proteção anticorrosiva. No caso dos tirantes reinjetáveis, são permitidas várias fases de injeção subsequentes. Estas reinjeções são possíveis devido a instalação de tubos de PVC perfurados e revestidos com válvulas manchete. As injeções posteriores proporcionam reforço do terreno na região do bulbo de ancoragem.

3.5.1. Fraturamento hidráulico

Segundo Brown (2001), o faturamento hidráulico consiste na injeção da calda sob alta pressão de modo a provocar deliberadamente o hidrofraturamento do solo, sendo a calda forçada a escoar através das fissuras preexistentes ou geradas pelo processo de injeção. Ao final do processo, a intenção é de que se produza uma rede de lentes interconectadas que atuará como elemento de reforço (Figura 3.15).

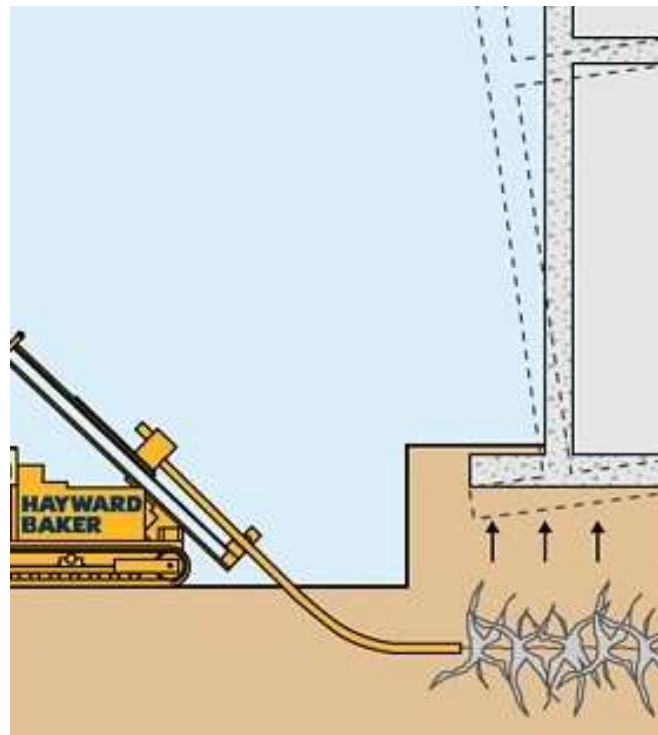


Figura 3.15: Injeção por fraturamento hidráulico (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).

O procedimento foi desenvolvido na França, num esforço para superar a dificuldade da maioria dos solos de absorver as caldas, devido ao tamanho insuficiente dos poros em relação às partículas das suspensões injetadas (BROWN, 2001). Desta forma, entende-se que numa injeção de calda à base de cimento comum e água não ocorre formação de argamassa ou solo-cimento. Pode ser aplicada em solos de qualquer granulometria (GUNARATNE, 2006).

A respeito da direção das fraturas, conforme Bezuijen (2010), a ideia clássica é que as fraturas se propagam perpendicularmente à direção da tensão principal menor. A pressão de injeção atua hidrostáticamente, e com a sua evolução, a tensão principal menor é a primeira a ser superada, resultando numa fratura. Em maciços terrosos, como geralmente a tensão principal

menor é a horizontal, resulta no surgimento de fraturas verticais. Como resultado dessas fraturas verticais tem-se um aumento da tensão horizontal até que excede a vertical. A partir deste ponto, a direção predominante das fraturas é horizontal.

De acordo com Lyomassa (2000), traços de calda entre 1:1 a 0,4:1 (em massa) são comumente utilizados nos tratamentos de maciços terrosos. A NBR 5629 (2018) especifica traços de 0,5:1, para injeção inicial de tirantes ancorados no terreno e de 0,5:1 a 0,7:1 para as reinjeções.

3.5.2. Compactação

Na injeção de compactação uma argamassa de baixa mobilidade, com slump variando de 25 a 100 mm, é injetada com alta pressão. As pressões variam de 2,5 a 4,0 MPa (MORAES, 2010). De acordo com Brown (2001), realizando-se o processo corretamente, não ocorre fratura hidráulica e a argamassa permanece em uma massa homogênea e em expansão, que desloca o solo radialmente, aumentando sua densidade e melhorando as propriedades (Figura 3.16).

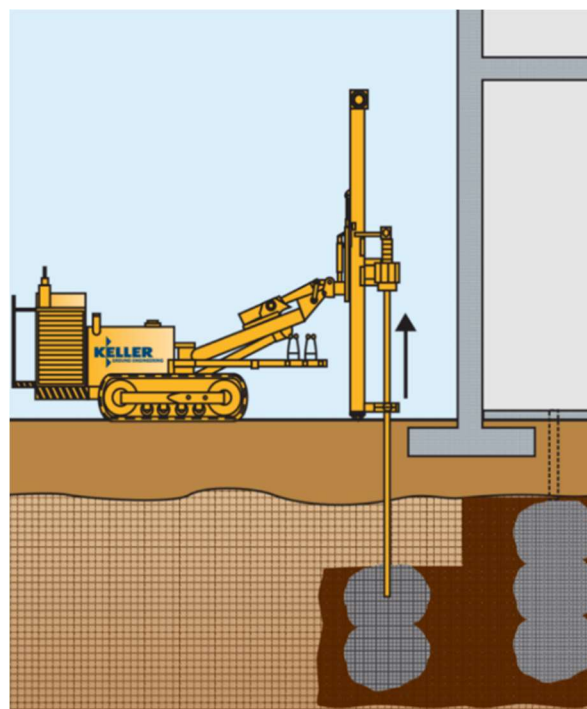


Figura 3.16: Densificação do solo pela injeção de compactação (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).

É fundamental que a argamassa permaneça numa massa globular, com uma interface argamassa-solo bem definida. Este processo tem sido utilizado com sucesso em vários tipos

de solos, embora, para a aplicação em argilas saturadas deve ser observado sua capacidade de dissipação das poro-pressões, o que requer baixas taxas de injeção.

3.5.3. Permeação

De acordo com Brown (2001), a injeção de permeação é a técnica de injeção mais antiga e amplamente utilizada. O processo consiste em fazer uma calda de baixa viscosidade permear pelos poros do solo, sem provocar modificações significativas na sua estrutura (Figura 3.17). As dimensões e a estrutura dos poros são determinantes na escolha do traço de calda que pode ser utilizado. Caldas produzidas a partir de cimento Portland comum tem partículas muito grandes para penetrar nos poros da maioria dos maciços terrosos, tendo seu uso limitado a areias grossas e pedregulhos, com até 18% de silte e 2% de argila (GUNARATNE, 2006).

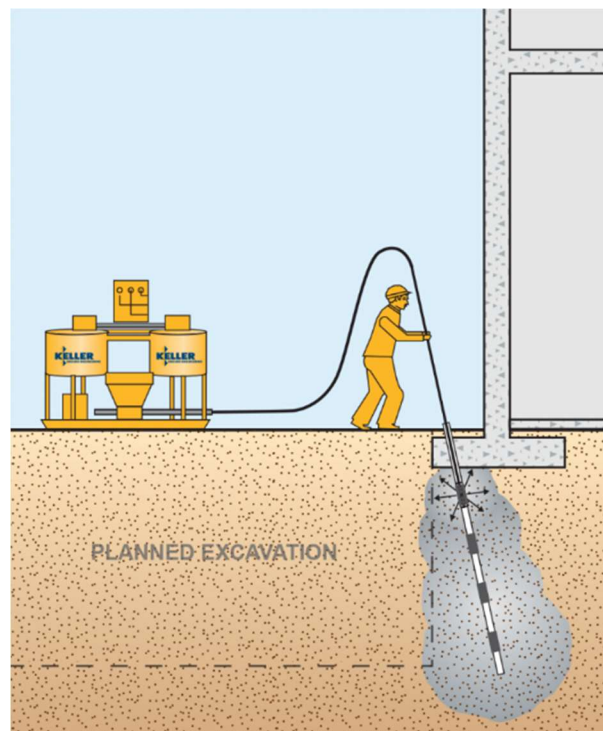


Figura 3.17: Solidificação do maciço pela permeação da calda (KELLER FOUNDATIONS CO., 2017).

Desta forma, na maioria dos tratamentos por este método são utilizadas caldas de microcimento ou outras soluções químicas. Segundo Andrus e Chung (1995), a pressão de injeção deve ser mantida, aproximadamente, em 25% da pressão de fratura hidráulica.

Este procedimento pode ser aplicado a qualquer tipo de solo, embora sua eficácia, ou seja, a resistência da argamassa formada, dependa da composição do solo local e da quantidade de calda injetada (GUNARATNE, 2006).

3.6. INJEÇÕES EM ESTACAS HELICOIDAIS

Poucos trabalhos foram publicados a respeito do efeito da injeção no comportamento das estacas metálicas helicoidais. Todos eles são experimentais e em sua maior parte os resultados são obtidos por meio de modelagem física. Nos trabalhos de laboratório foram ensaiados modelos reduzidos de estacas metálicas helicoidais instaladas em areia testados a 1g e acelerados em centrifuga (MANKE, 2004; BIAN, 2006; LAEFER et al., 2007; BIAN et al., 2008; KHAZAEI e ESLAMI, 2016). Os ensaios em verdadeira grandeza (SANCHEZ, 2014 e NABIZADEH e CHOBBASTI, 2016; 2017) foram realizados em solos arenosos, silto-arenosos e argilosos.

No âmbito dos trabalhos de laboratório, Manke (2004) realizou ensaios em 32 modelos de estacas metálicas helicoidais de duas hélices, na escala 1:8, instaladas em areia. A injeção de calda de microcimento ($a:c = 0,44$, em massa) foi feita durante a instalação, desde a superfície. Os modelos de estacas eram compostos por duas hélices de 50,8 mm (2") montadas em um tubo de 12,7 mm (1/2") de diâmetro e 864 mm de comprimento. A saída da nata de cimento foi feita através de dois furos localizados na ponta da estaca, abaixo da primeira hélice. O objetivo do teste foi avaliar sistemas de fundações compostos por grupos de 2x2 e 3x3 estacas escavadas reforçadas por estacas helicoidais injetadas. As estacas dos grupos mediam 57 mm de diâmetro e 457 mm e a instalação das estacas helicoidais foi feita entre as estacas do grupo com um ângulo de 11° com a vertical (Figura 3.19). Como não havia uma ligação das estacas de reforço com o bloco de concreto a diferença no comportamento do bloco com e sem reforço foi pouco significativa. Os ensaios realizados foram provas de carga a compressão e lateral nos componentes individuais e em suas combinações.

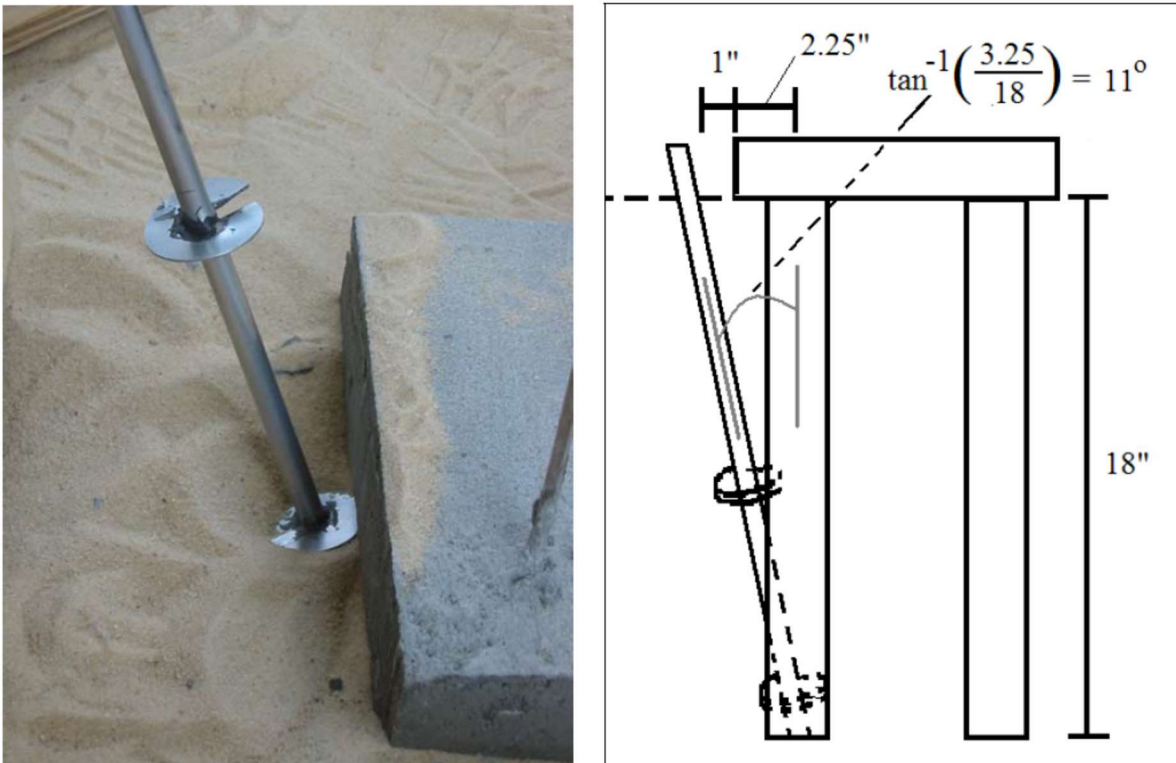


Figura 3.19: Posicionamento das estacas de reforço (MANKE, 2004).

Em seu trabalho, Bian (2006) fez ensaios em centrífuga em modelos de estacas de uma hélice injetadas na profundidade final. Os modelos foram instalados em maciços de areia com D_{50} igual a 0,42 mm e a calda foi composta por microcimento (tamanho médio de partículas de 3 μm).

Apesar de ter realizado poucas provas de carga e de ter ocorrido flambagem na haste no ensaio da estaca injetada, Bian (2006) fez comparações e estimativas da capacidade de carga axial das estacas helicoidais injetadas com base nos resultados dos ensaios e na observação da geometria final após a injeção de seus modelos. O autor concluiu que o incremento na capacidade de carga seria grande, da ordem de 380-860%. As principais conclusões de Bian (2006) foram: caldas com fatores a:c menores produzem bulbos maiores em procedimentos de injeção similares; a aplicação de rotação (sem avanço da estaca) durante a injeção proporciona um aumento no diâmetro do bulbo de 60 a 100%; e os bulbos são maiores quando a pressão de injeção é maior para um mesmo traço de calda.

O formato dos bulbos indica que ocorreu permeação da calda pelos poros da areia, o que é compatível com a associação do uso de microcimento, maciço de textura granular sem finos

e baixa pressões de injeção (pressão máxima suportada pelo dispositivo de injeção utilizado foi de 100 kPa).

Khazaei e Eslami (2016) realizaram ensaios de tração e compressão em modelos de estacas helicoidais instaladas em câmara de calibração. As estacas testadas tinham duas hélices de 89 mm, montadas em tubo de 32 mm. A injeção de calda de cimento, foi feita em três configurações de posicionamento de furos para saída de calda: abaixo da primeira hélice, entre as duas hélices e acima da segunda hélice. Comparando com a estaca sem injeção, os autores observaram incrementos de 25-50% na capacidade de carga (carga convencional para 15% do diâmetro da hélice), sendo os melhores resultados obtidos quando a injeção é realizada acima da segunda hélice (Figura 3.20). Eles concluem que a injeção pode compensar grande parte dos efeitos da instalação da estaca no solo.

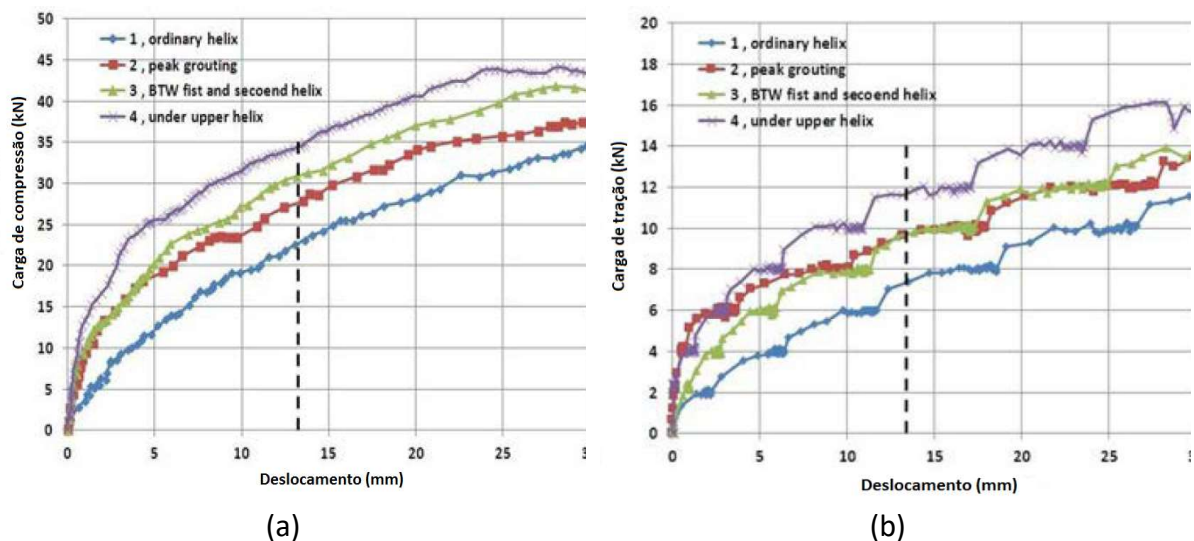


Figura 3.20: Curvas carga vs. deslocamento das provas de carga realizadas nos modelos, sendo (a) de compressão e (b) de tração (KHAZAEI e ESLAMI, 2016).

Sanchez (2014) realizou o primeiro estudo com estacas helicoidais injetadas no Brasil. Foram realizadas as instalações e provas de carga em quatro estacas helicoidais, sendo duas sem injeção, que serviram como referência para as análises e duas com injeção de calda de cimento. As estacas eram compostas por três hélices quadradas de 203 - 254 - 305 mm de lado montadas em tubo de $\phi 73 \times 6,4$ mm com dois níveis de furos para saída da calda de cimento do interior da estaca, abaixo da primeira e da segunda hélice. As conexões entre os elementos da estaca foram rosqueadas para garantir a vedação. A profundidade de instalação foi de 4,0 m, estando as hélices em silte areno-argiloso, com N_{SPT} da ordem a 6. Os ensaios

foram realizados em Betim-MG. O traço da calda de cimento injetada foi de 0,6:1 (a:c, em massa) e a injeção foi feita utilizando um vaso separador bifásico (ar comprimido/calda) interligado a um compressor móvel à diesel, modelo XAS-136 de 295 PCM de descarga livre efetiva, marca Atlas Copco, que introduzia uma pressão de 700 kPa ao sistema de injeção. Neste tipo de sistema de injeção o ar comprimido é introduzido na parte superior do vaso separador bifásico que contem a calda. A calda pressurizada então flui através de mangueira conectada à base do vaso e é direcionada à estaca já instalada.

Como resultado, Sanchez (2014) obteve um incremento médio na capacidade de carga à tração de 104%. Posteriormente foi feita a exumação das estacas injetadas, onde verificou-se que a nata preencheu os espaços eventualmente deixados pela passagem das hélices sem que, no entanto, ocorresse formação de solo-cimento, tendo sido constatado que o fluxo ocorreu majoritariamente na vertical, para cima, apesar das estacas possuírem furos na ponta (abaixo da primeira hélice). Distingue-se claramente as placas de calda de cimento endurecido do solo circundante (Figura 3.21).

Em seus trabalhos de campo, Nabizadeh e Choobbasti (2016) instalaram e ensaiaram a compressão estacas helicoidais de uma, duas e três hélices em dois sítios experimentais distintos. Em cada local foram executadas 6 estacas, sendo três injetadas e 3 não injetadas, tomadas como referência, todas com 6,0 m de comprimento (Figura 3.22). O subsolo do sítio 1, localizado no Norte do Iran, na cidade de Sari, era composto por argila siltosa, com N_{SPT} entorno de 22. Já no sítio 2, localizado na cidade de SurkhRood, Norte do Iran, as estacas foram instaladas em areia com N_{SPT} de 21, aproximadamente. A calda utilizada nas injeções tinha traço variando de 0,40 a 0,55 (a:c, em massa) e foi injetada utilizando-se bomba de pistão. Não foi apresentada a localização dos furos para saída da calda e nem o volume injetado. Os torques desenvolvidos durante a instalação também não foram apresentados. Os resultados indicaram ganhos de capacidade de carga variando de 8-28% nas estacas instaladas em argila e de 14-24% para as estacas instaladas em areia. Os ganhos crescem com o número de hélices, mas, não linearmente.



Figura 3.21: Detalhe das placas de calda endurecida (SANCHEZ, 2014).

Posteriormente, Nabizadeh e Choobbasti (2017) apresentaram mais resultados de ensaios a tração e a compressão realizados em estacas com as mesmas configurações e seguindo o mesmo procedimento de instalação, injeção e prova de carga apresentados em Nabizadeh e Choobbasti (2016). Os ensaios foram executados na cidade de Baldosar, Norte do Iran. O campo de testes apresenta camada superficial de areia com N_{SPT} médio de 21 de um até 6,0 m de profundidade. Os autores não apresentaram os torques de instalação das estacas. Os resultados mostraram que as estacas convencionais de duas e três hélices em compressão têm comportamento similar, indicando que a hélice intermediária da estaca de três hélices (espaçamento entre hélices sendo de $1,5.D$) está na zona de influência da hélice superior, não mobilizando carga. Entretanto, os ensaios à tração das estacas convencionais não apresentam a mesma tendência, sugerindo um possível problema de instalação ou diferenciação de comportamento devido a heterogeneidade do solo local. As medidas do torque de instalação poderiam corroborar tais afirmações.

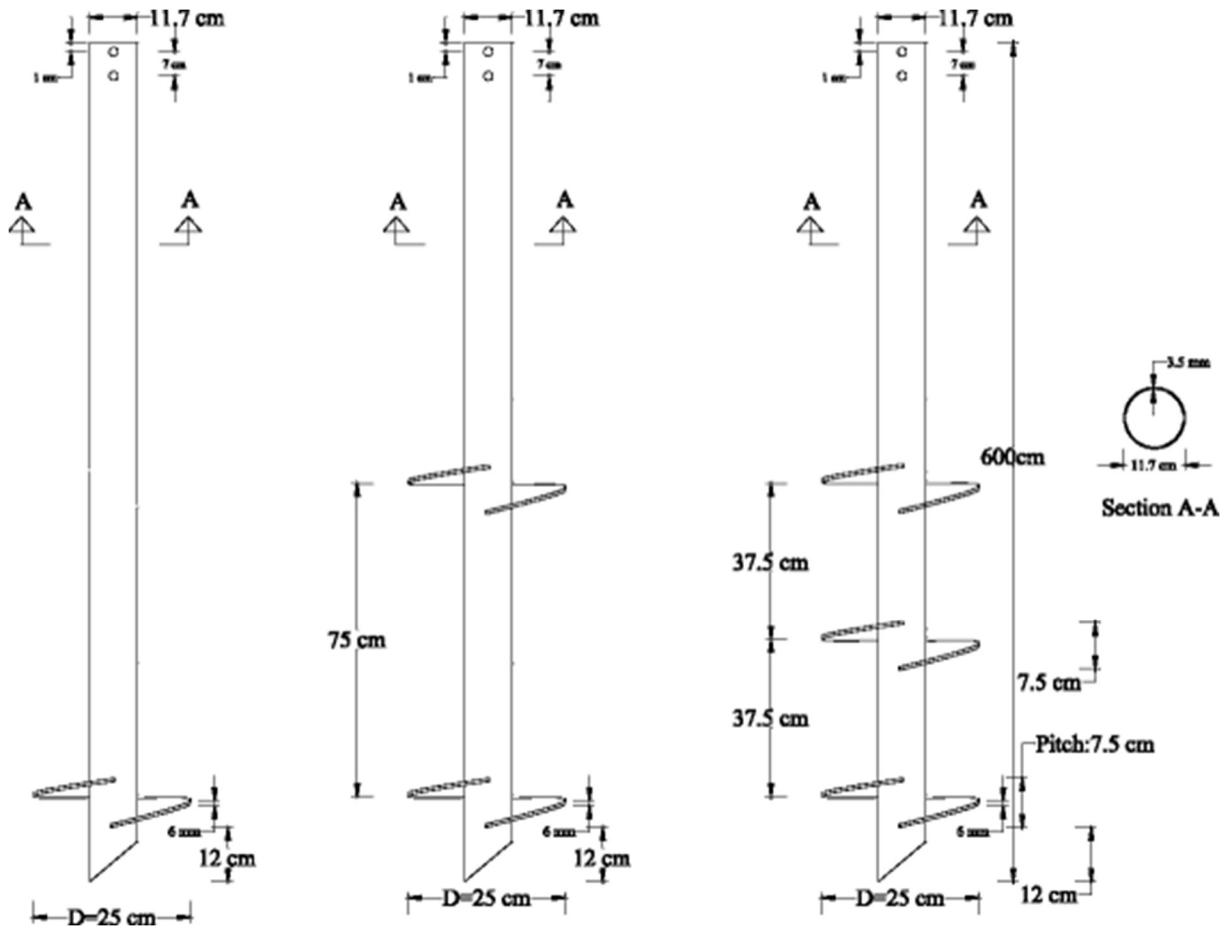


Figura 3.22: Configuração das estacas ensaiadas (NABIZADEH e CHOORBASTI, 2016).

Em compressão, os resultados indicaram ganhos de 20% para a estaca de uma hélice, de 29% para a estaca de duas hélices e de 25% para a estaca de três hélices. Em tração, a estaca de uma hélice apresentou ganho de 5%, as de duas e três hélices apresentaram ganhos de 10% e 7%, respectivamente.

Não foi apresentado o posicionamento dos furos para a saída de calda do interior da estaca, mas, devido a constatação de que a calda fluiu majoritariamente para cima, feita por Sanchez (2014) e também neste trabalho, supõem-se que o ganho apresentado pela estaca de uma hélice é devido somente ao incremento de atrito lateral nas hastes. Considera-se que os ganhos de capacidade de carga à tração apresentados pelas estacas foram baixos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos aplicados neste trabalho. A presente pesquisa foi desenvolvida com base em ensaios de campo, onde foram executadas 49 provas de carga, sendo 46 à tração e três à compressão, em quatro áreas distintas (Figura 4.1):

- Área 1: Campo Experimental de Fundações do CRHEA, em Itirapina – SP (6 estacas);
- Área 2: Campo de Testes da Vercon/Vértice, em Betim – MG (18 estacas);
- Área 3: Campo Experimental de Fundações da EESC, em São Carlos – SP (19 estacas);
- Área 4: Obra de Linha de Transmissão, em Barreirinhas – MA (6 estacas, sendo três ensaiadas à tração e três à compressão);



Figura 4.1: Localização das áreas experimentais.

Os procedimentos de execução, injeção e ensaios empregados nas áreas experimentais são similares, pois busca-se, por meio de uma análise integrada dos resultados, avaliar o efeito da injeção de calda de cimento no comportamento de fundações por estacas helicoidais. O método da pesquisa consiste na instalação de estacas próximas entre si e sob o mesmo critério de paralisação da instalação, sendo executadas em três condições:

- Não injetadas (REF): estacas convencionais, tomadas como referência de comportamento. Totalizando 17 ensaios, com exemplares executados em todas as áreas experimentais;
- Injetadas (INJ): estacas instaladas da mesma maneira que as convencionais, mas com as emendas convenientemente vedadas e posteriormente injetadas com calda de cimento. Totalizando 22 ensaios, com exemplares executados em todas as áreas experimentais;
- Injetadas com obturador inflável (INJ-S): executadas da mesma maneira que as Injetadas, mas, tendo um obturador inflável inserido na composição. Totalizando 10 ensaios, com exemplares executados em todas as áreas experimentais com exceção da Área 1;

4.1. INSTALAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS ENSAIADAS

As estacas ensaiadas foram instaladas utilizando-se conjunto moto-redutor hidráulico acoplado a retroescavadeira ou caminhão guindauto. Durante a instalação, o torque aplicado foi acompanhado por meio de torquímetro digital, fabricado pela Vértice Engenharia com capacidade nominal de 27 kN.m, inserido em série com a composição. Foram feitas marcações com giz escolar ao longo da haste central da estaca para indicação da profundidade e tomada das leituras do torque de instalação. As leituras foram realizadas a cada 0,50 m de penetração da estaca no terreno. Na Figura 4.2 são apresentados os equipamentos utilizados para instalação das estacas e o detalhe do torquímetro para medida do torque de instalação. Onde foi possível, foram executadas estacas aos pares ou trios (denominadas com a inscrição 01, 02 e 03), ou seja, sob os mesmos critérios de instalação e injeção (ou não, no caso de estacas de referência), para investigações acerca da repetibilidade do processo e possibilidade de aplicação de tratamento estatístico.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2: (a) e (c) Retroexcavadeira e caminhão guindauto com moto-reductor hidráulico acoplados para instalação de estacas helicoidais e (b) torquímetro digital inserido na composição de instalação.

Com exceção das instalações na Área 3, o critério de paralisação das instalações foi o torque de instalação, ou seja, cada grupo (as estacas são denominadas com as inscrições de G1 a G12) em estudo foi executado de modo que os valores de torque médio medido no último metro de instalação (T_M) fossem similares. Desta forma, ocorreram variações dos comprimentos instalados. As instalações da Área 3 foram realizadas de modo que as estacas do mesmo grupo tivessem o mesmo comprimento instalado. Desta maneira, os T_M obtidos ao final têm maior dispersão em relação à média do grupo.

As estacas executadas e ensaiadas na Área 1 foram instaladas em ângulo de 40° com a vertical. Este é o ângulo típico de instalação de ancoragens de estais de torres estaiadas monomastro. Todas as estacas executadas nas demais áreas experimentais (Áreas 2, 3 e 4) foram instaladas na vertical (ângulo zero).

Conforme Hoyt e Clemence (1989), na definição do fator torque (K_t) a ser usado na equação empírica para estimativa da capacidade de carga à tração deste tipo de fundação, o torque final de instalação considerado é o valor médio necessário para a penetração final de um comprimento correspondente a três vezes o diâmetro da maior hélice da estaca. Como o diâmetro da maior hélice utilizada nas estacas ensaiadas é 356 mm, esta distância de penetração seria de 1,07 m. Nesta pesquisa, o comprimento de penetração final considerado para definição dos valores de T_M/K_t foi de 1,0 m.

O espaçamento das hélices de todas as estacas fabricadas foi de três vezes o diâmetro da hélice inferior, e o passo foi de 90 mm. Os tubos utilizados são de aço do tipo VMB 350 COR e as chapas helicoidais são tipo CSN COR 500. As conexões entre seção guia e extensões das estacas foram feitas por meio de ligações tipo ponta e bolsa aparafusadas com três parafusos M22 x 150 (aço ISO 4016 Classe 8.8). As estacas foram fabricadas pela Vercon Industrial.

Nesta pesquisa foram ensaiadas estacas de três, quatro e seis hélices, montadas em tubos de duas seções diferentes: (1) 88,9 mm de diâmetro externo e 7,62 mm de espessura de parede ($\phi 88,9 \times 7,62$ mm) e (2) 101,6 mm de diâmetro externo e 7,10 mm de espessura de parede ($\phi 101,6 \times 7,10$ mm). As estacas de três hélices foram somente em tubo $\phi 88,9 \times 7,62$ mm e as demais em ambas as seções de tubos utilizados. Foi utilizada chapa de 12,5 mm de espessura na fabricação das hélices. Estas dimensões são típicas em obras de fundações de torres de linhas de transmissão de energia no Brasil.

As dimensões da seção guia e o posicionamento dos furos para saída de calda (dois níveis de furos) da estaca de três hélices está apresentada na Figura 4.3. A seção guia da estaca de quatro hélices, também utilizada na composição das estacas de seis hélices, tem as dimensões conforme a Figura 4.4, onde também está indicado o posicionamento dos furos para saída da calda (três níveis de furos).

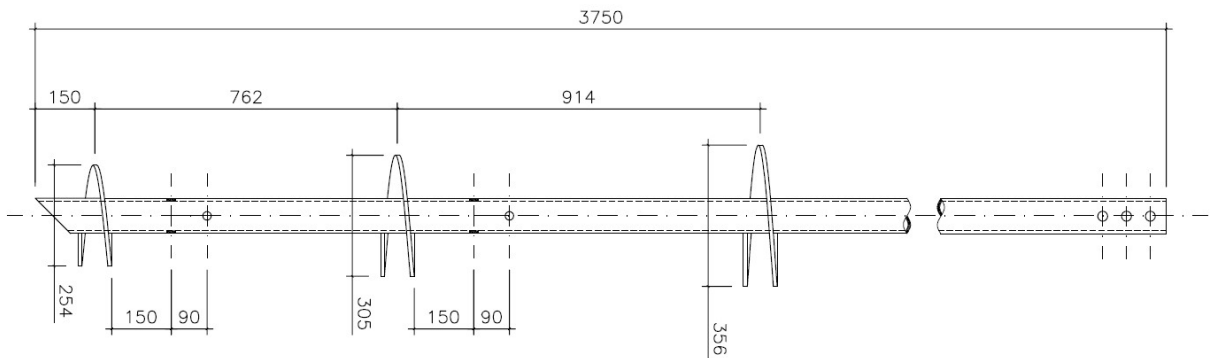


Figura 4.3: Seção guia das estacas de três hélices e posicionamento dos furos para saída de calda.

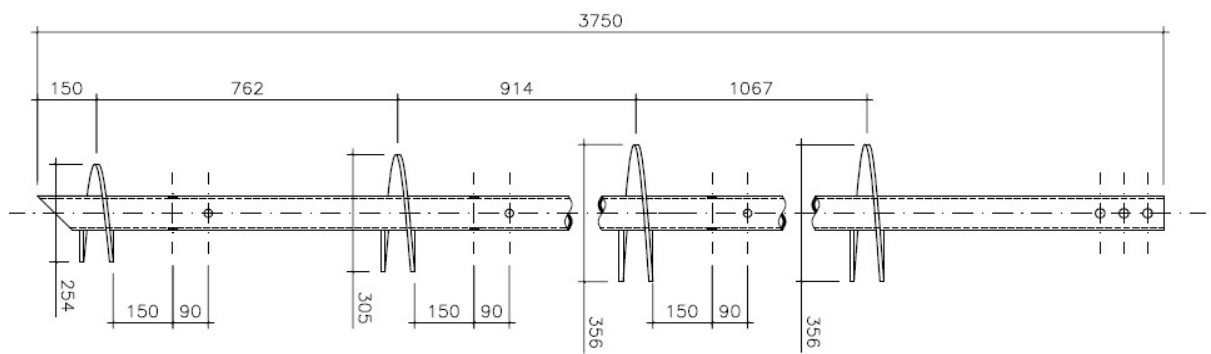


Figura 4.4: Seção guia das estacas de quatro e seis hélices e posicionamento dos furos para saída de calda.

A Figura 4.5 apresenta as dimensões da extensão com hélices utilizada para composição da estaca de seis hélices. A estaca de seis hélices é obtida pelo acoplamento da extensão com duas hélices à seção guia de quatro hélices.

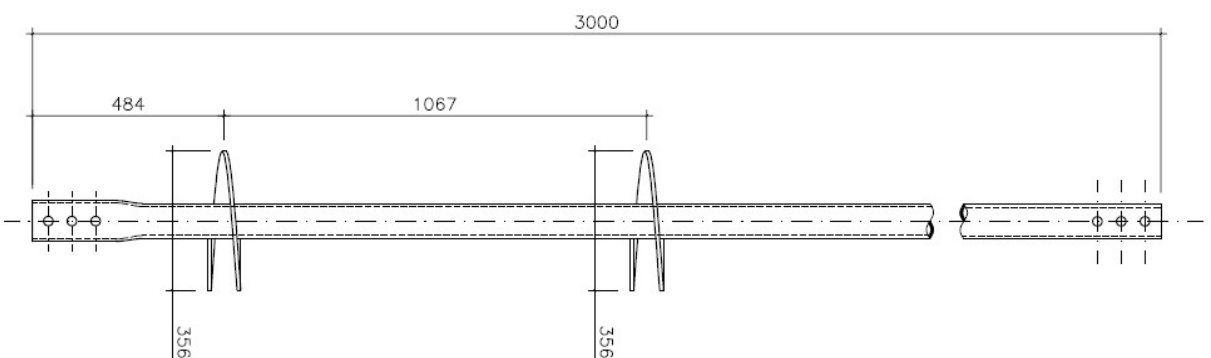


Figura 4.5: Extensão com duas hélices para composição de estacas de seis hélices.

A Tabela 4.1 resume as características das estacas helicoidais utilizadas no desenvolvimento deste trabalho e as denominações dadas a cada uma delas (modelos), que são mencionadas ao longo de todo o texto, inclusive nos gráficos de instalações e ensaios, juntamente com a classificação do tipo de estaca (estacas helicoidais convencionais de referência, estacas helicoidais injetadas, estacas helicoidais injetadas com obturador inflável, respectivamente: REF, INJ, INJ-S).

Tabela 4.1: Resumo das composições e suas denominações.

Modelos	Número de hélices	Tubo (mm)	Diâmetro das hélices (mm)
3H-88	3	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356
4H-88	4	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356 – 356
4H-101	4	$\phi 101,6 \times 7,10$	254 – 305 – 356 – 356
6H-88	6	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356 – 356 – 356 – 356
6H-101	6	$\phi 101,6 \times 7,10$	254 – 305 – 356 – 356 – 356 – 356

4.2. PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO

O procedimento adotado consiste na injeção de calda de cimento, em fase única, pelo interior das hastas tubulares das estacas. A injeção é finalizada quando se observa o extravasamento da calda na superfície do terreno ou quando um volume máximo preestabelecido é absorvido. O que ocorrer primeiro determina a interrupção do processo. Nesta pesquisa o volume máximo a ser injetado numa estaca foi limitado ao correspondente a seis sacos de cimento de 50 kg, o que implica num volume máximo de 0,247 m³.

A calda injetada sai do interior da haste através de furos executados na seção guia, entre as hélices. Foram executados dois níveis de furos para saída da calda nas seções guia de três hélices e três níveis de furos nas seções guia de quatro e de seis hélices. Detalhes do posicionamento dos furos para saída de calda estão apresentados nas Figura 4.3 e 4.4. Cada nível de furação possui dois furos passantes de 25 mm de diâmetro (mesmo diâmetro dos furos dos parafusos das emendas), defasados de 90°, aproximadamente (Figura 4.6), o que proporciona um total de quatro aberturas para saída de calda do interior da estaca para o maciço.



Figura 4.6: Detalhe da furação para saída da calda.

A calda foi injetada utilizando-se uma bomba de pistão GEOMAC GSA-90, que produz uma vazão de até 80 l/min e uma pressão máxima de 6.500 kPa. O fluxo é direcionado à estaca por meio de mangueira compatível com a pressão desenvolvida, sendo esta interligada à cabeça da estaca por meio de uma ferramenta de acoplamento (obturador). O volume injetado é medido pela quantidade de sacos de cimento de 50 kg (V_{inj}). O procedimento não permite saber a quantidade de calda absorvida em cada nível de furação e nem a reinjeção da estaca. Foi utilizado cimento Portland CP IV-40 (NBR 16697, 2018) na produção das caldas injetadas. A Figura 4.7 apresenta uma visão geral dos equipamentos utilizados no procedimento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.7: Equipamentos e ferramentas utilizados na injeção de calda de cimento: (a) misturador elétrico, (b) reservatório de calda pronta, (c) bomba de pistão e (d) obturador para acoplamento da linha de injeção à estaca.

4.2.1. Vedações

Devido ao fato das estacas helicoidais serem compostas por várias peças conectadas, para que se tenha garantia de que a calda adsorvida no processo de injeção e que, eventualmente, extravasa na superfície (situação observada na Figura 4.7, d) do terreno preencheu os possíveis espaços provocados pela passagem das hélices de baixo para cima (como observado na Figura 3.21), foi desenvolvido um sistema de vedação para os acoplamentos das peças das estacas. O espaço anular proveniente da folga da bolsa expandida em relação ao diâmetro externo do tudo, necessário para montagem, é vedado por meio de um *o-ring* de borracha colado na parte interna das bolsas. A Figura 4.8 apresenta o detalhe da vedação das bolsas.



Figura 4.8: Vedação das bolsas de acoplamento.

As folgas dos furos dos parafusos são vedadas por meio de *o-ring* de borracha. Deste modo, cada emenda da estaca demanda um *o-ring* na bolsa e dois por parafuso da ligação. Nesta pesquisa, todos os acoplamentos das estacas possuíam três parafusos (Figura 4.9).



Figura 4.9: Vedação dos parafusos.

4.2.2. Obturador inflável

Devido ao diâmetro externo das conexões entre os trechos de estaca ser maior que o diâmetro das hastes, é criado um espaço vazio entre a haste e o solo circundante, que prejudica a resistência por atrito lateral na haste quando a fundação é carregada. Esse espaço cria um caminho preferencial para onde a calda flui à superfície do terreno com relativa facilidade. Essa ocorrência foi observada já nas primeiras injeções realizadas no âmbito desta pesquisa. Por um lado, este preenchimento é benéfico pois melhora as condições de confinamento lateral, importante nos casos onde a estaca trabalha à compressão (devido a possibilidade de flambagem) e, em todos os casos, deve ocorrer incremento da parcela devida ao atrito lateral na capacidade de carga. Embora não seja o foco desta pesquisa, entende-se também que o preenchimento dos espaços ao redor das hastes seja positivo nos aspectos relativos à corrosão no aço.

Entretanto, como a resistência por atrito lateral na haste tem pouca contribuição na capacidade de carga deste tipo de fundação, e sabendo-se que a melhoria nas propriedades do maciço de solo tratado está intrinsecamente relacionada à pressão de injeção, um meio de proporcionar incremento na pressão de injeção e de concentrar o tratamento

especificamente no solo na região das hélices poderia otimizar a quantidade de cimento utilizado no tratamento *versus* melhorias proporcionadas, tornando o processo mais eficiente.

Para este fim, foi desenvolvida nesta pesquisa de doutorado uma peça denominada de obturador inflável, que tem o objetivo de obstruir o fluxo de calda que eventualmente tenda a subir pelo espaço vazio ao redor da haste. A patente do dispositivo e do processo foi requerida junto ao INPI.

O obturador inflável é composto por um cilindro de borracha com diâmetro interno correspondente ao diâmetro externo da haste central da estaca. A peça é arrematada por dois anéis de aço que têm função de impedir a expansão das extremidades do obturador inflável, o que é necessário para vedar a interface haste-obturador.

Internamente, o obturador inflável é dotado de dispositivos que possibilitam com que ele seja expandido. Nos testes realizados, a pressão de expansão do obturador foi de 400 kPa. A Figura 4.10 apresenta uma vista do obturador inflável montado numa extensão lisa.



Figura 4.10: Obturador inflável montado em extensão de estaca helicoidal.

A peça é montada numa extensão lisa, que pode ser inserida na composição da estaca a qualquer momento durante a instalação. Entretanto, a peça que contém o obturador deve ser

oportunamente inserida de modo que o solo ao redor seja capaz de conter sua expansão livre, que caso ocorra, redundará no rompimento do obturador.

A profundidade de instalação do obturador inflável (LS), computada da superfície do terreno até o centro do obturador, conforme mostra a Figura 4.11, é indicada nas tabelas juntamente com os demais resultados.

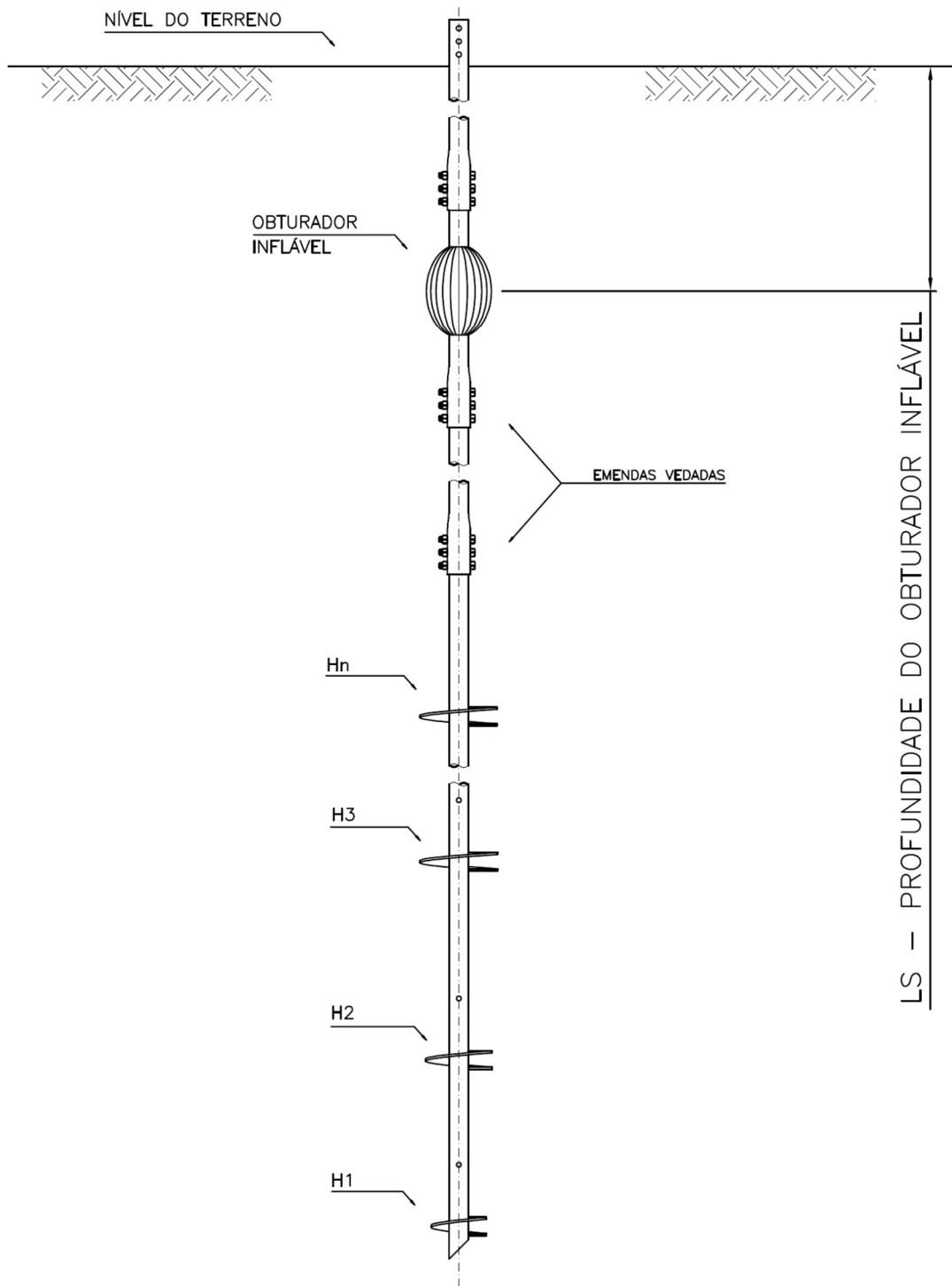


Figura 4.11: Posição do obturador inflável na composição da estaca.

4.3. PROVAS DE CARGA

As provas de carga realizadas foram do tipo rápida, de acordo com a NBR 12.131 (2006). O carregamento foi aplicado em estágios sucessivos, sendo realizadas leituras dos deslocamentos a cada cinco minutos (permitido para fundações de torres de linhas de transmissão), independentemente da ocorrência de estabilização. Os afastamentos mínimos entre estacas ensaiadas e estacas de reação ou apoios do sistema de reação foram de acordo com o especificado na NBR 12.131 (2006).

Nos projetos/obras de fundações de estruturas de transmissão a prática é manter os estágios de carregamento por um minuto e por cinco minutos apenas na carga máxima. Este procedimento resulta em um tempo total de 10 minutos para se atingir o carregamento total da fundação, que é mantido por mais cinco, totalizando 15 minutos até que se inicie o descarregamento. Esse tempo é suficiente para avaliar o comportamento da fundação quando submetida ao carregamento oriundo da ação do vento e é compatível com o tempo de integração da média para definição da velocidade do vento considerado nos projetos.

Foram utilizados dois sistemas de reação, empregados de acordo com o ângulo de instalação das estacas. Para estacas verticais (ângulo zero), o sistema de reação utilizado foi composto por viga metálica, em perfil duplo I, de 6,0 m de comprimento simplesmente apoiada em fogueiras de dormentes para os ensaios de tração. Para os ensaios de compressão, outras estacas helicoidais (trabalhando a tração) foram utilizadas como reação.

Para os casos onde as estacas foram instaladas inclinadas (somente ensaios de tração), foi utilizado um tripé metálico dotado de grelhas metálicas para apoio direto no terreno e uma retroescavadeira para auxílio no equilíbrio da componente horizontal. Neste sistema, uma parcela da componente horizontal é suportada pela resistência ao deslizamento (ou escorregamento) das grelhas do tripé, onde atua integralmente a componente vertical do carregamento. Outra parcela da componente horizontal é suportada pela retroescavadeira. Para mobilização da componente horizontal do sistema de reação durante a aplicação do carregamento ocorre escorregamento do tripé. Um sistema perfeitamente rígido seria impraticável.

Nos ensaios realizados nesta pesquisa, o escorregamento (deslocamento horizontal do sistema de reação) foi medido e chegou a até 70 mm, o que corresponde a uma rotação da ordem de 1° da estaca em relação ao nível do terreno. Esta rotação, embora esteja dentro da tolerância de execução das estacas, provoca um acréscimo no deslocamento medido pelos relógios comparadores. Nesta pesquisa, este acréscimo de deslocamento foi desconsiderando. No entanto, eles devem ser considerados em ensaios de verificação de desempenho, principalmente onde os critérios de aceitação sejam estreitos. De qualquer maneira, a desconsideração conduz a uma condição conservadora, uma vez que o deslocamento medido é maior que o que acontece se não ocorre escorregamento do tripé.

Nas áreas experimentais 1, 2 e 3 foram executados ensaios apenas de tração. Já na Área 4 foram executados ensaios de compressão e de tração. Na denominação das estacas está inserida a inscrição indicativa do tipo de carregamento aplicado no ensaio, “T” para os ensaios de tração e “C” para os ensaios de compressão. Os ensaios realizados na Área 1 foram em estacas inclinadas. Todos os demais foram em estacas verticais.

Em todos os ensaios foi aplicada uma carga de ajuste, não sendo medidos os deslocamentos das estacas até atingir este carregamento inicial. Nas estacas verticais, essa carga de ajuste foi padronizada em 20 kN. Já nos ensaios inclinados (somente na Área 1), a carga de ajuste foi padronizada em 50 kN, pois essa era, aproximadamente, a carga indicada pela célula de carga quando realizado o tensionamento dos cabos de interligação da retroescavadeira ao tripé de reação.

O carregamento foi aplicado por cilindro hidráulico de haste vazada, marca Enerpac modelo RRH1006 com capacidade máxima de 931 kN conectado a uma bomba manual. Os deslocamentos foram medidos por meio de dois relógios comparadores marca Mitutoyo de 100 mm de curso e resolução de 0,01 mm, posicionados diametralmente opostos. A aferição da carga aplicada foi feita por meio de célula de carga (tipo coluna de seção vazada, com capacidade de 1.000 kN e resolução de 0,1 kN, marca Alfa Instrumentos modelo C-100T) interligada a indicador digital. Nas Figuras 4.12 a 4.14 são apresentados os três sistemas de reação utilizados.

Nos ensaios à tração, foi utilizada uma ferramenta de acoplamento parafusada (mesma furação e parafusos das demais emendas das estacas) e uma barra de ancoragem Sistema

Dywidag 95/105 de 32 mm de diâmetro para transmissão do carregamento à estaca. Nos ensaios à compressão, foi utilizada uma ferramenta de acoplamento com uma chapa para distribuição do carregamento diretamente na cabeça da estaca.



Figura 4.12: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à tração em estacas verticais.



Figura 4.13: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à tração em estacas inclinadas.



Figura 4.14: Sistema de reação utilizado nas provas de carga à compressão.

De acordo com Perko (2009), a geometria das estacas helicoidais, haste central delgada ligada à elementos de apoio largos (hélices), faz com que elas se comportem como estacas de ponta ou sapata em profundidade. Devido às modificações no solo provocadas pela instalação da estaca, a mobilização completa da carga das hélices de uma estaca helicoidal, ou seja, quando se atinge a ruptura geotécnica, que é caracterizada pelo deslocamento crescente sem acréscimo de carga, somente é atingida para deslocamentos grandes, da ordem de 20% do diâmetro das hélices, ou mais.

Em ensaios de tração realizados pelo autor em estacas helicoidais instaladas em solos do Brasil foram observados deslocamentos maiores, da ordem de 50% do diâmetro das hélices, para atingir a ruptura geotécnica. Na experiência do autor, os valores mais baixos de deslocamento relativo para atingir a ruptura, da ordem de 10% do diâmetro das hélices, são associados ao comportamento de estacas helicoidais em areias sem finos e baixos torques de instalação. Considera-se que a estaca rompeu (ruptura geotécnica) quando se desloca continuamente sem acréscimo de carregamento.

No entanto, a sensibilidade de algumas estruturas aos movimentos das fundações exige limitações de deslocamento total, e por este motivo a capacidade de carga das estacas é frequentemente convencionada com base em critérios de deslocamento (PERKO, 2009). No caso de fundações de torre de linhas de transmissão, os deslocamentos admissíveis são consideravelmente superiores aos máximos permitidos para estruturas convencionais, por exemplo, edifícios de concreto armado. De acordo com Milititski (2019), a magnitude dos deslocamentos de fundações de estruturas de transmissão não governa o projeto, pois a limitação de deslocamento das torres é pouco rigorosa, prevalecendo o atendimento do requisito de segurança à ruptura.

Sakr (2014), Lutenegger (2008) e Perko (2009) comentam que foram publicados vários métodos para interpretação da capacidade de carga de fundações por estacas por meio de curvas carga *versus* deslocamento obtidas em provas de carga, e fizeram a aplicação de alguns métodos comumente utilizados a resultados de provas de carga em estacas helicoidais. Todos concluem que cada método aplicado conduz a um resultado interpretado de capacidade de carga, e que eles são consideravelmente diferentes entre si. Esta mesma observação se verifica para outros tipos de estacas e a definição do critério para definição da carga de projeto ou da carga de ruptura é de responsabilidade do projetista da fundação, sendo observado o deslocamento admitido pela estrutura e a segurança.

Os critérios para definição de capacidade de carga mais aceitos pela comunidade técnico-científica para estacas helicoidais assumem que a capacidade de carga da fundação seria a carga relativa ao deslocamento correspondente a uma fração do diâmetro das hélices acrescido (parcela constante), ou não, do deslocamento devido à deformação elástica da haste central (parcela variável). Por exemplo, o critério estabelecido no AC 358 (ICCES, 2012), onde se trata de estacas helicoidais para fundação de edifícios, convencionou a carga de ruptura como a carga que provoca um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio das hélices mais o deslocamento elástico da haste. A consideração do deslocamento devido à deformação elástica é importante neste tipo de fundação, principalmente em estacas longas, uma vez que pode chegar mesmo a ser maior que a parcela constante dos critérios para definição da capacidade de carga. O deslocamento elástico retrocede completamente quando o carregamento é retirado, não induzindo qualquer esforço em estruturas estaiadas. Em torres autoportantes o deslocamento diferencial decorrente do elástico para fora do plano

dos pés deve ser avaliado e mantido dentro dos limites aceitáveis. Os deslocamentos limites são indicados na IEC 60826 (2017).

No caso de estacas helicoidais não sujeitas a inversão de esforços e na condição de que 100% sejam ensaiadas, antes da realização da prova de carga propriamente dita, pode ser aplicada a carga de projeto (solicitação da torre majorada em 10%) sem que se compute o deslocamento correspondente. Neste caso, este primeiro carregamento é considerado como parte do procedimento executivo da estaca e não como ensaio. Este procedimento não altera a carga de ruptura geotécnica da fundação. A estaca é considerada rompida quando se descoloca continuamente sem acréscimo de carregamento.

Nesta pesquisa, a capacidade de carga à tração e à compressão das estacas (Q_U) foi convencionada como a carga que provoca um deslocamento do topo da estaca correspondente a 8% do diâmetro da maior hélice mais o deslocamento devido à deformação elástica da haste. Este critério foi proposto por Livneh e El Naggar (2008). Para os ensaios realizados, os valores correspondentes ao deslocamento elástico das hastes ficaram compreendidos entre 2 e 29 mm. Foi utilizado um critério que considera o deslocamento elástico das hastes devido às diferenças nos comprimentos instalados das estacas de um mesmo grupo e aplicação mais abrangente das fundações. Como a maior hélice presente em todas as estacas possui 356 mm de diâmetro, a capacidade de carga fica definida como a interseção da reta representada pela Equação 8 com a curva carga aplicada *versus* deslocamento obtida na prova de carga.

$$\Delta = 0,08.356 + \frac{P \cdot L}{E \cdot A} \quad [mm] \quad (8)$$

onde:

Δ : deslocamento calculado, em mm;

P : Carga aplicada na estaca, em N ;

L : Comprimento da estaca, em mm;

E : Módulo de elasticidade do aço, 200.000 MPa;

A : Área da seção transversal da haste central da estaca (área de aço), em mm^2 .

Esta carga Q_U , juntamente com o torque final médio de instalação (T_M), foi utilizada para definição do fator torque (K_t) obtido para as estacas ensaiadas nesta pesquisa. Portanto, $Q_U = K_t \cdot T_M$, com base na Equação 1.

4.4. 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 25 km do Campus 1 da EESC, sob as coordenadas geográficas $22^\circ 10' 12''$ (S) e $47^\circ 53' 53''$ (O). Neste terreno, até o momento, já foram desenvolvidos dois trabalhos de mestrado (SANTOS, 2013 e SANTOS FILHO, 2014). A Figura 4.15 apresenta uma visão geral do local dos ensaios.



Figura 4.15: Visão geral da Área 1.

Neste local foram realizadas seis instalações, em ângulo de 40° com a vertical (ângulo típico em ancoragens de estais), e provas de carga em estacas de quatro e seis hélices em tubo $\phi 88,9 \times 7,62$ mm (modelos 4H-88 e 6H-88). As estacas foram divididas em dois grupos de três elementos, denominados de G1 e G2, cujas estacas são apresentadas na Tabela 4.2. Em cada uma das provas de carga foram realizados dois ciclos de carregamento e descarregamento. O

objetivo destes ensaios foi avaliar o comportamento das estacas injetadas em solo residual laterítico poroso de baixa resistência, N_{SPT} entorno de 6. O torque utilizado como critério de paralisação da instalação foi de 8,80 kN.m (6.500 lbf.ft). O valor de torque foi definido de forma que as estacas convencionais tivessem capacidades de carga da ordem de 200 kN. O torque foi estimado através da Equação 1 com um valor de K_t de 23 m^{-1} , conforme Tabela 3.1. A Figura 4.16 apresenta a locação de todas as estacas instaladas e ensaiadas na Área 1, e também a locação de ensaios de campo.

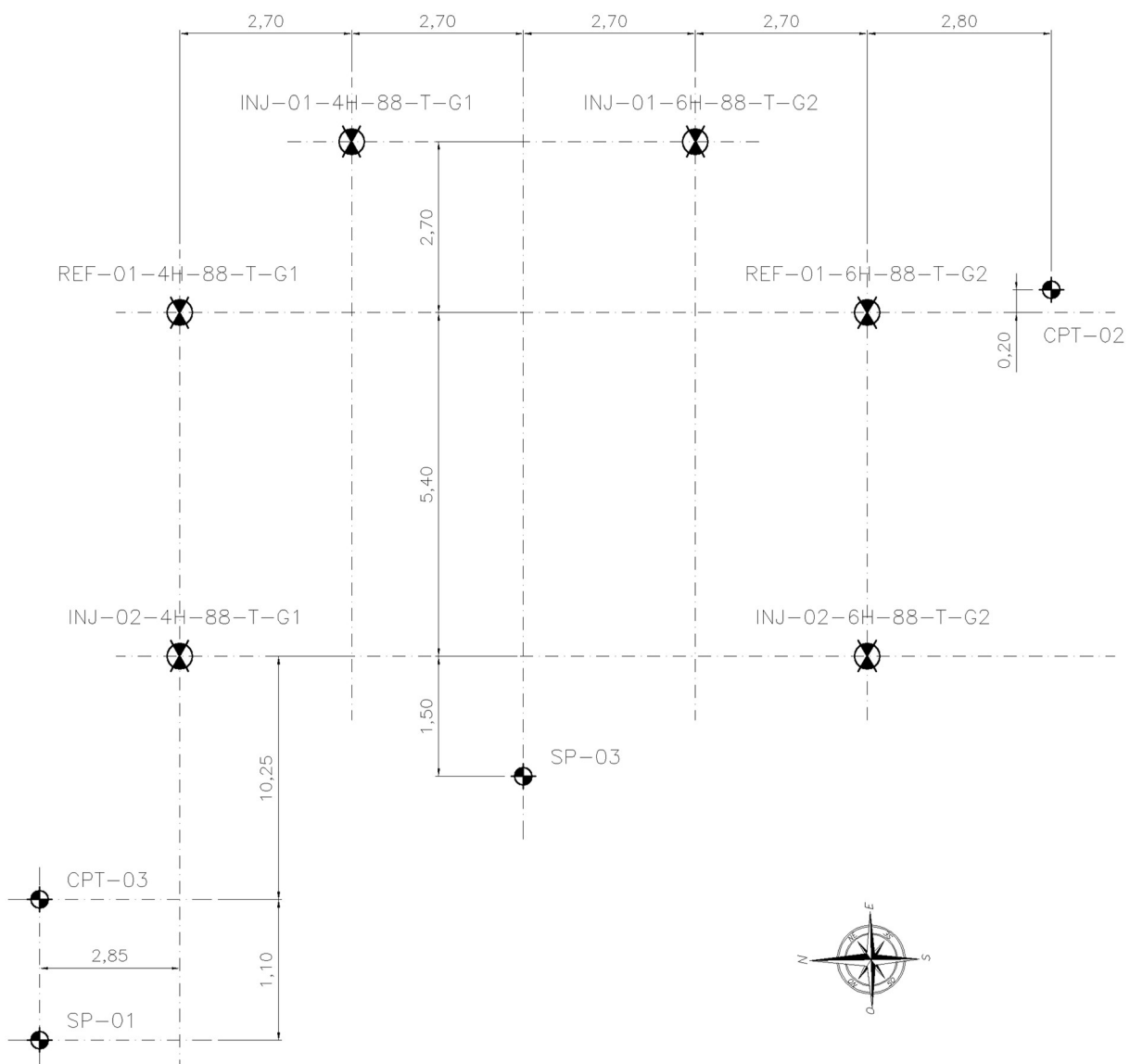


Figura 4.16: Locação das estacas ensaiadas e dos pontos onde foram realizados ensaios *in situ* na Área 1 (medidas em metros).

Em seu trabalho, Santos (2013) realizou nove provas de carga à tração em estacas helicoidais de uma, duas e três hélices montadas em tubo de 73 mm de diâmetro externo. Para

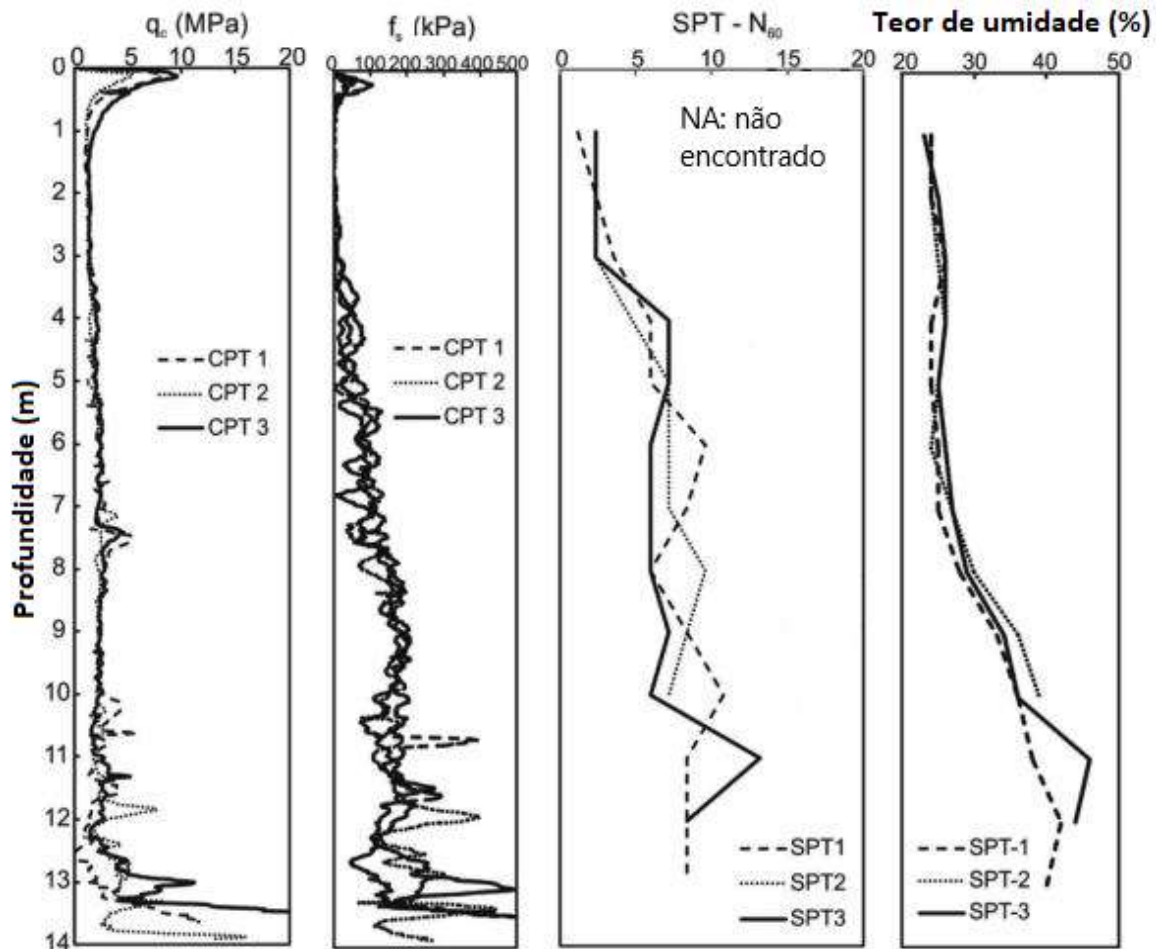


Figura 4.18: Resultados de ensaios *in situ* realizados na Área 1 (TSUHA et. al, 2015).

4.5. ENSAIOS ÁREA 2

A Área 2 localiza-se em Betim/MG e corresponde ao Campo de Testes da Vercon/Vértice, que fica localizada na R. Grassyra Resse de Gouvêia, Jardim Piemonte, sob as coordenadas geográficas 19° 57' 27" (S) e 44° 04' 14" (O). Neste sítio foram realizadas 18 provas de carga, divididas em cinco grupos (G3 a G7). A Figura 4.19 apresenta uma visão geral do local onde os ensaios foram executados. A Tabela 4.3 resume as estacas pertencentes aos grupos G3 a G7.

Nos ensaios correspondentes aos grupos G3 a G6, cada grupo foi composto por três estacas, sendo uma REF (estaca helicoidal convencional) e duas do tipo INJ (injeção simples, sem obturador), totalizando 12 estacas. Os grupos G3 e G4 consistiram de instalações e provas de carga em estacas de modelos 4H-101 e 6H-101, respectivamente. Já os grupos G5 e G6 foram compostos por estacas modelos 4H-88 e 6H-88, respectivamente. Todas as estacas foram instaladas até atingir o torque máximo resistido (limite estrutural) pelo tubo (haste central da

estaca). Para o tubo $\phi 88,9 \times 7,62$ mm o torque máximo é de 17,63 kN.m (13.000 lbf.ft) e para o tubo $\phi 101,6 \times 7,10$ mm é de 22,37 kN.m (16.500 lbf.ft).



Figura 4.19: Visão geral da Área 2.

O grupo G7 foi composto por seis estacas modelo 4H-88, sendo duas REF, duas INJ e duas INJ-S (injeção com obturador inflável). O torque final médio de instalação (T_M) foi de 8,13 kN.m (6.000 lbf.ft). O torque foi definido de forma que a possibilitar que fosse possível definir a capacidade de carga das estacas nas provas de carga, ou seja, sem a necessidade de extrapolações. A Figura 4.20 apresenta a locação de todas as estacas instaladas na Área 2 e de duas sondagens à percussão realizados para caracterização deste terreno.

Tabela 4.3: Resumo das estacas dos grupos G3 a G7 instaladas e ensaiadas na Área 2.

Estacas G3		Estacas G4		Estacas G5		Estacas G6	
REF-01-4H-101-T-G3		REF-01-6H-101-T-G4		REF-01-4H-88-T-G5		REF-01-6H-88-T-G6	
INJ-01-4H-101-T-G3		INJ-01-6H-101-T-G4		INJ-01-4H-88-T-G5		INJ-01-6H-88-T-G6	
INJ-02-4H-101-T-G3		INJ-02-6H-101-T-G4		INJ-02-4H-88-T-G5		INJ-02-6H-88-T-G6	
Estacas G7							
REF-01-4H-88-T-G7	REF-02-4H-88-T-G7	INJ-01-4H-88-T-G7	INJ-02-4H-88-T-G7	INJ-S-01-4H-88-T-G7	INJ-S-02-4H-88-T-G7		

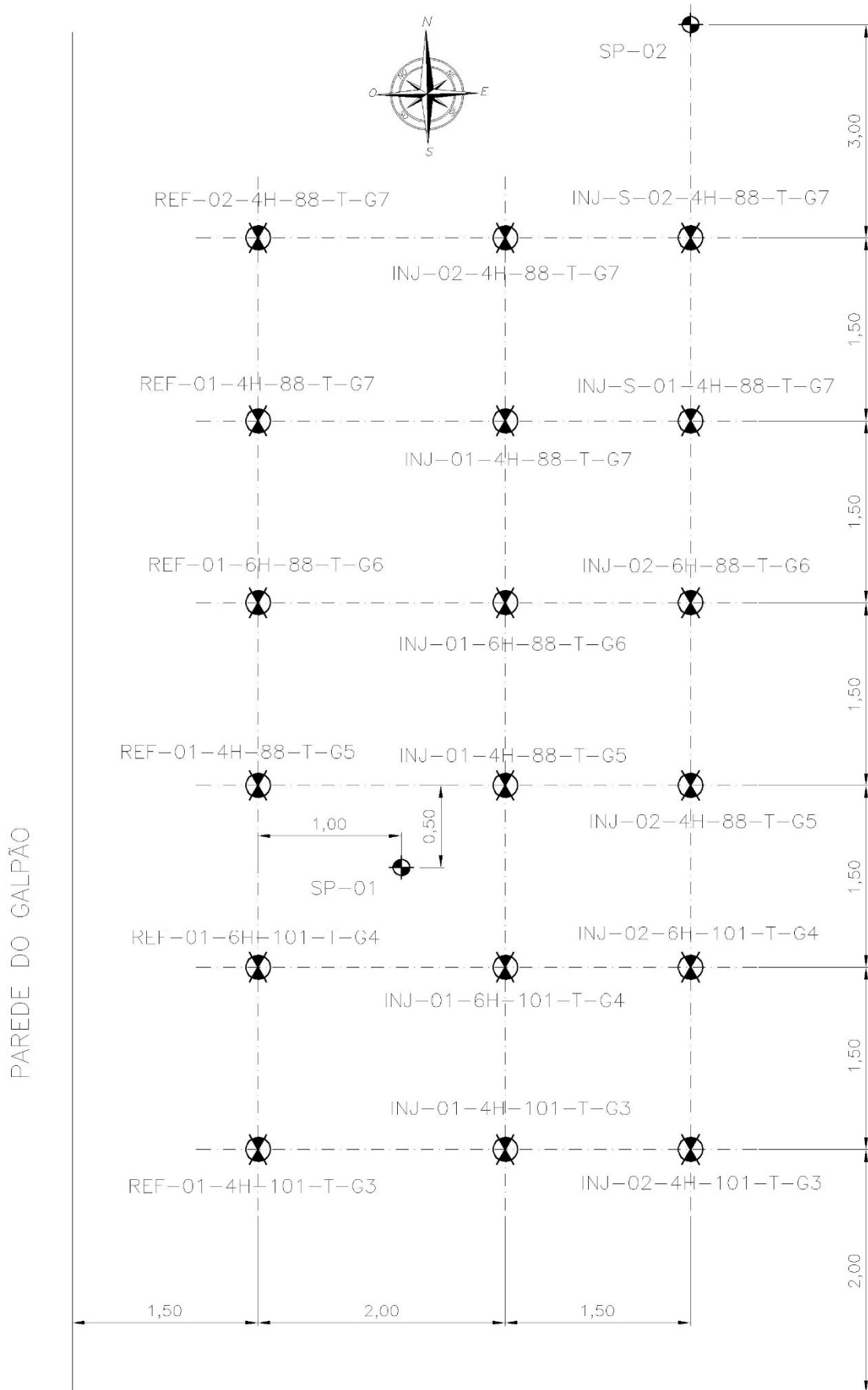


Figura 4.20: Localização das estacas ensaiadas e das sondagens à percussão realizadas na Área 2 (medidas em metros).

De acordo com Romano et al. (2009), a Área Experimental 2 está geologicamente inserida no Complexo Belo Horizonte, onde estão assentadas as cidades de Contagem, Betim e Belo Horizonte, sendo constituído por rocha ácida do tipo gnaise. A Figura 4.21 apresenta o perfil representativo do terreno.

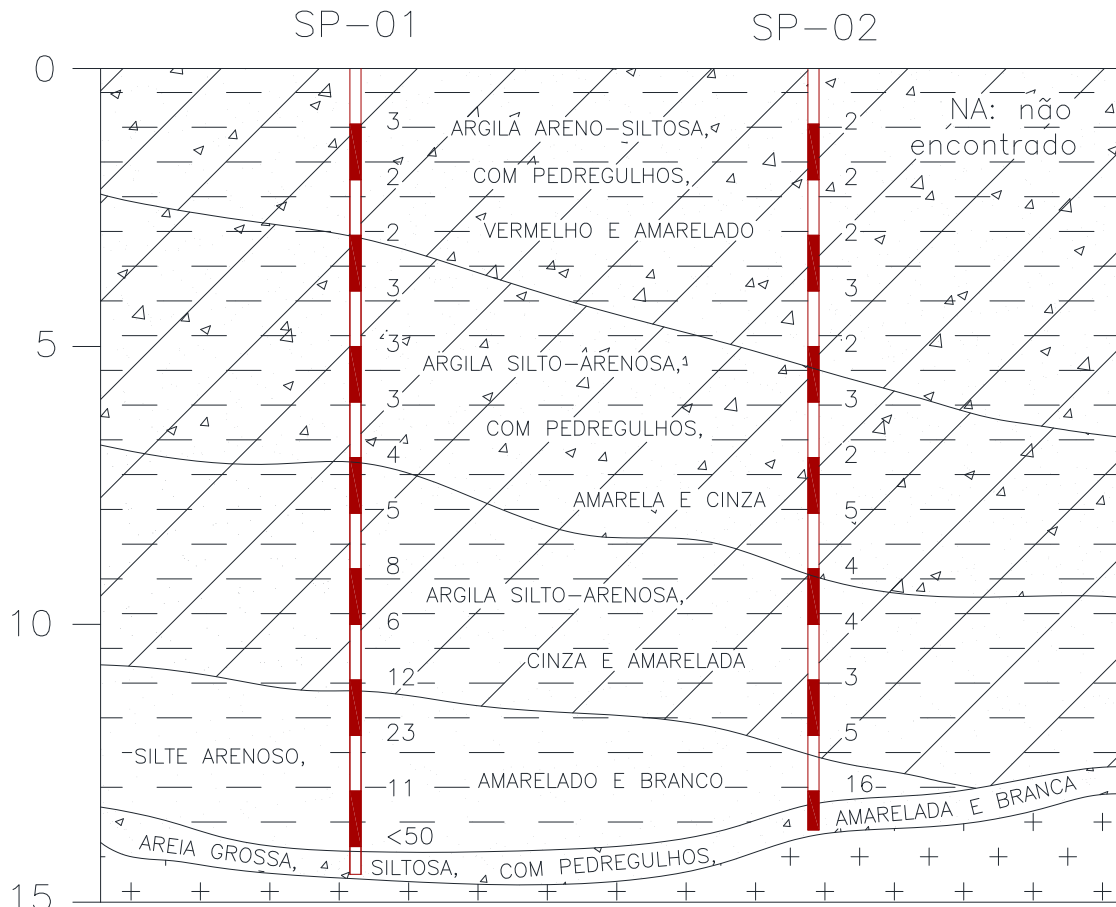


Figura 4.21: Perfil geotécnico provável da Área 2 (medidas em metro).

4.6. ENSAIOS ÁREA 3

O Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) fica localizado na área Sul do Campus 1 da Universidade de São Paulo, no bairro central da cidade de São Carlos-SP, sob as coordenadas geográficas $22^{\circ} 01' 22''$ (S) e $47^{\circ} 53' 38''$ (O). Neste trabalho, esta área experimental foi designada como Área 3. A Figura 4.22 mostra uma vista geral do local de realização dos experimentos. De acordo com Cavalcanti et al. (2006), este campo foi fundado no ano de 1988, e é considerado um dos mais antigos sítios experimentais pertencentes a instituições de ensino e pesquisa. Foi implantado, inicialmente, numa área de 1.200 m^2 . Desde a sua criação, dezenas de trabalhos em nível de mestrado e doutorado foram

desenvolvidos nesta área experimental (CAVALCANTI et al., 2006). Atualmente, o campo encontra-se em plena atividade.



(a)

(b)

Figura 4.22: (a) e (b) Vista geral da Área 3.

Nesta área foram realizadas 19 instalações e provas de carga, tendo sido as estacas divididas em três grupos (G8, G9 e G10). Os grupos G8 e G9 foram compostos por duas estacas tipo REF, duas do tipo INJ e duas tipo INJ-S, totalizando seis elementos em cada grupo. O grupo G10 foi composto por três estacas REF, duas INJ e duas INJ-S (totalizando 7 estacas). As estacas de cada grupo foram executadas com os mesmos comprimentos instalados, desta forma ocorreu maior dispersão nos valores médios de T_M de cada grupo. Foram realizados ensaios em estacas modelo 4H-101 instaladas com 8,0 m e 16,0 m, compondo os grupos G8 e G9, respectivamente. O grupo G10 foi composto por estacas modelo 6H-101 instaladas com 8,0 m. A Figura 4.23 apresenta a planta de locação das 19 estacas ensaiadas na Área 3. A Tabela 4.4 resume as estacas pertencentes aos grupos G8 a G10.

AFEESC

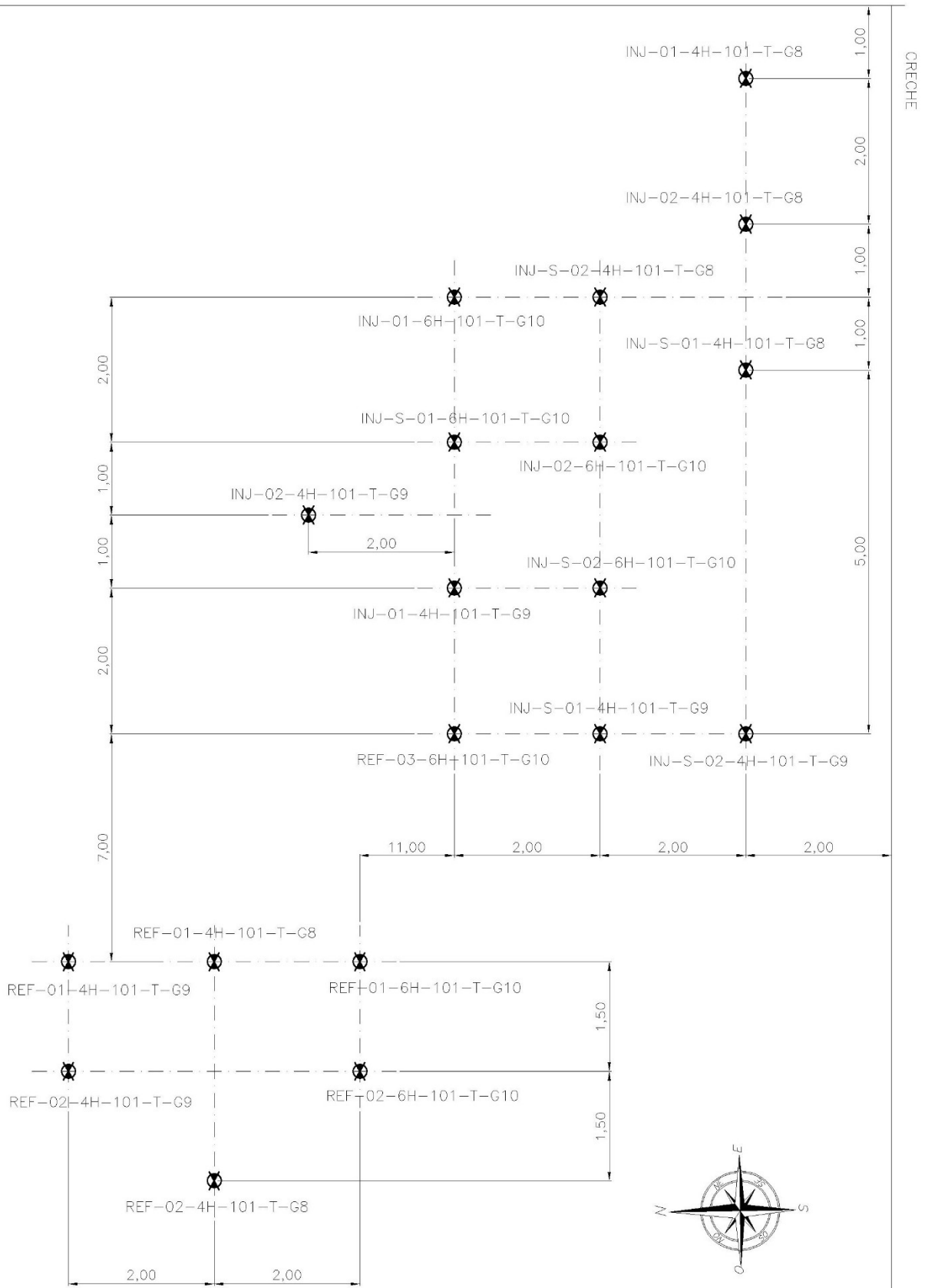


Figura 4.23: Localização das estacas ensaiadas na Área 3 (medidas em metros).

Além de estacas destinadas à realização de provas de carga à tração para as avaliações referentes à influência da injeção de calda de cimento no comportamento de fundações por estacas helicoidais (capacidade de carga e deslocamentos), foram instaladas duas estacas curtas (denominadas INJ-2H-101-EXUM e INJ-S-2H-101-EXUM), com 3,0 m de profundidade, com (INJ-S) e sem (INJ) obturador inflável, com o objetivo exclusivo de avaliar o espalhamento da calda injetada no maciço de solo para cada tipo de estaca helicoidal com injeção (com e sem obturador inflável).

A estaca INJ-S-2H-101-EXUM foi fabricada de modo que o obturador ficasse posicionado a 1,0 m de profundidade em relação à superfície do terreno. As estacas possuíam duas hélices montadas em tubo $\phi 101,6 \times 7,10$ mm e um nível de furação para saída de calda entre as hélices. A Figura 4.24 apresenta a geometria das estacas instaladas para injeção e exumação, sendo as especificações dos materiais as mesmas das demais estacas ensaiadas nesta pesquisa. As estacas foram instaladas afastadas de 2,0 m entre si e injetadas da mesma maneira que as demais. Após o tempo de cura da calda, executou-se a escavação para observação do posicionamento da calda endurecida em relação à estaca.

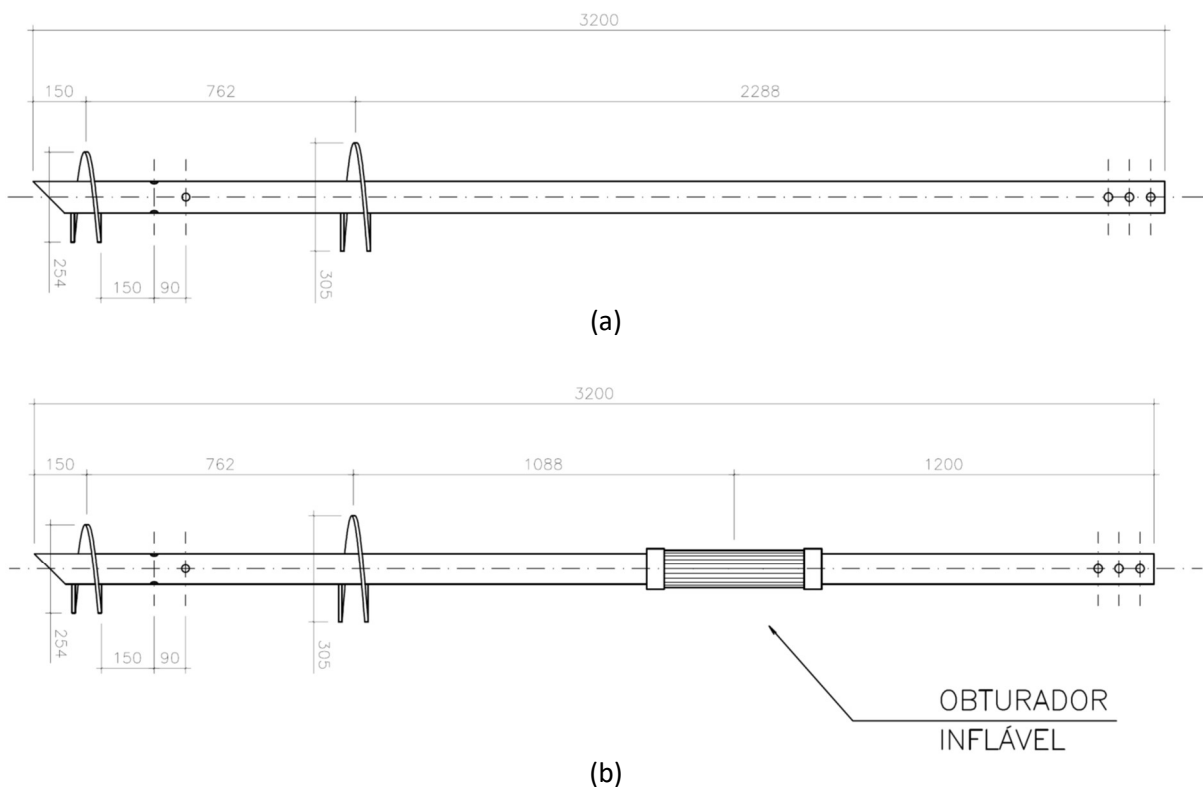


Figura 4.24: Geometria das estacas destinadas a exumação para verificação de espalhamento da calda injetada no solo (medidas em milímetro): (a) INJ-2H-101-EXUM e (b). INJ-S-2H-101-EXUM.

A escavação foi feita utilizando-se uma retroescavadeira até a profundidade de 3,20 m e 0,60 m de afastamento da estaca. Posteriormente, prosseguiu-se escavando manualmente na direção horizontal, até que a estaca fosse atingida, procurando preservar tanto quanto possível as lentes/placas de calda de cimento endurecida à medida que eram encontradas. A Figura 4.25 apresenta o início do processo de escavação das estacas com a retroescavadeira e pelo processo manual.



(a)



(b)

Figura 4.25: Escavação entre as estacas para verificação do espalhamento da calda no maciço de solo com a (a) retroescavadeira e (b) processo manual.

A cidade de São Carlos está assente sobre rochas do Grupo São Bento, compostas por arenitos da Formação Botucatu e migmatitos básicos da Formação Serra Geral. Acima destas rochas ocorrem arenitos e conglomerados do Grupo Bauru. Em seguida, Sedimentos Cenozóicos recobrem toda a região (CAVALCANTI et al., 2006). O perfil do campo experimental da EESC/USP é composto por uma camada superficial de areia argilosa com N_{SPT} variando de 1 a 5, de comportamento comprovadamente colapsível. Abaixo desta camada, separada por uma linha de seixos de quartzo e limonita, existe uma camada de areia argilosa (solo residual de arenito do Grupo Bauru). O nível d'água varia sazonalmente entre 9,0 m e 12,0 m, estando a

10,5 m na época de realização dos ensaios. A Figura 4.26 mostra o perfil geotécnico, a Figura 4.27 apresenta alguns resultados de ensaios *in situ* realizados na Área 3 e na Tabela 4.5 são apresentadas as frações granulométricas constituintes dos solos nas profundidades de 3,0 m, 5,0 m e 8,0 m.

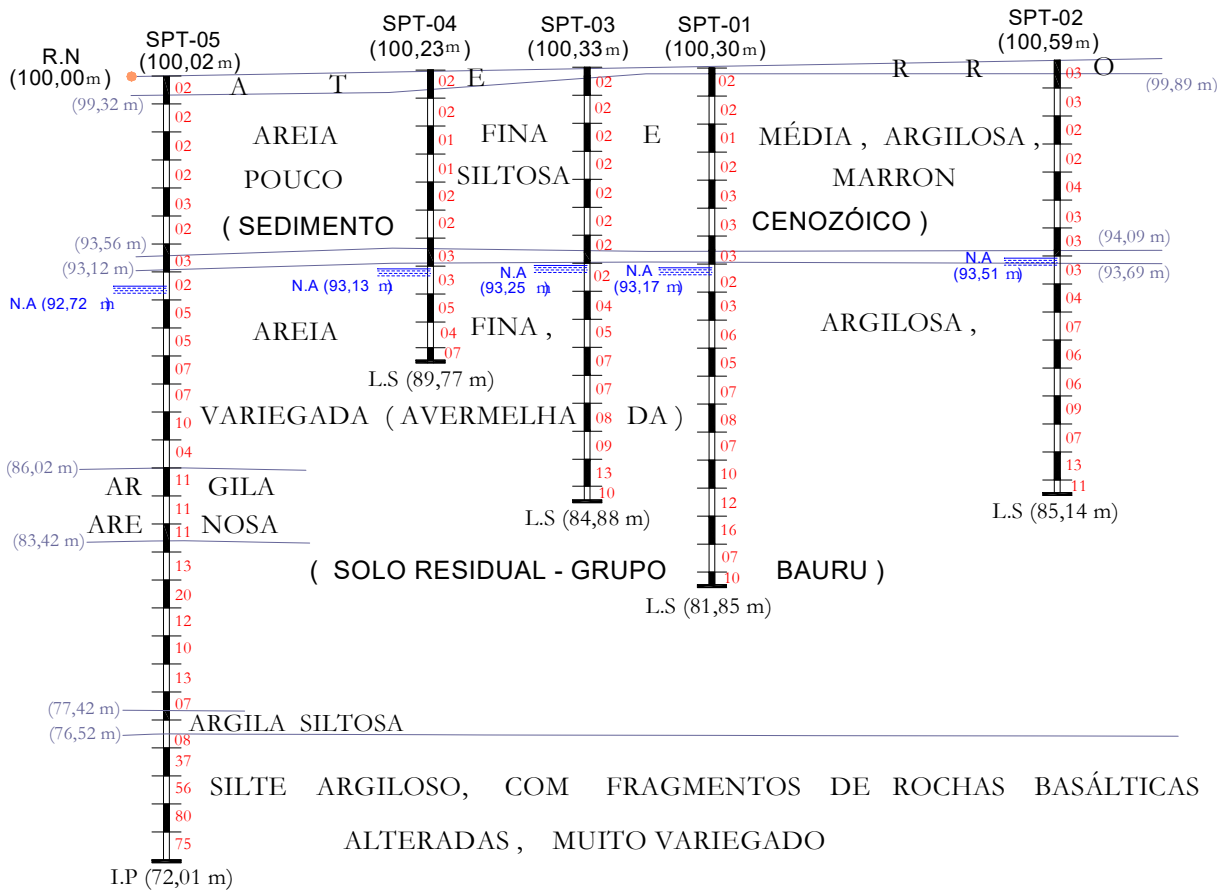


Figura 4.26: Perfil geotécnico provável da Área 3, a partir da 3ª campanha de sondagens à percussão (SANTOS, 2001).

Tabela 4.4: Resumo das estacas dos grupos G8 a G10 instaladas e ensaiadas na Área 3.

Estacas G8					
REF-01-4H-101-T-G8	REF-02-4H-101-T-G8	INJ-01-4H-101-T-G8	INJ-02-4H-101-T-G8	INJ-S-01-4H-101-T-G8	INJ-S-02-4H-101-T-G8
Estacas G9					
REF-01-4H-101-T-G9	REF-02-4H-101-T-G9	INJ-01-4H-101-T-G9	INJ-02-4H-101-T-G9	INJ-S-01-4H-101-T-G9	INJ-S-02-4H-101-T-G9
Estacas G10					
REF-01-6H-101-T-G10	REF-02-6H-101-T-G10	REF-03-6H-101-T-G10	INJ-01-6H-101-T-G10	INJ-02-6H-101-T-G10	INJ-S-01-6H-101-T-G10
					INJ-S-02-6H-101-T-G10

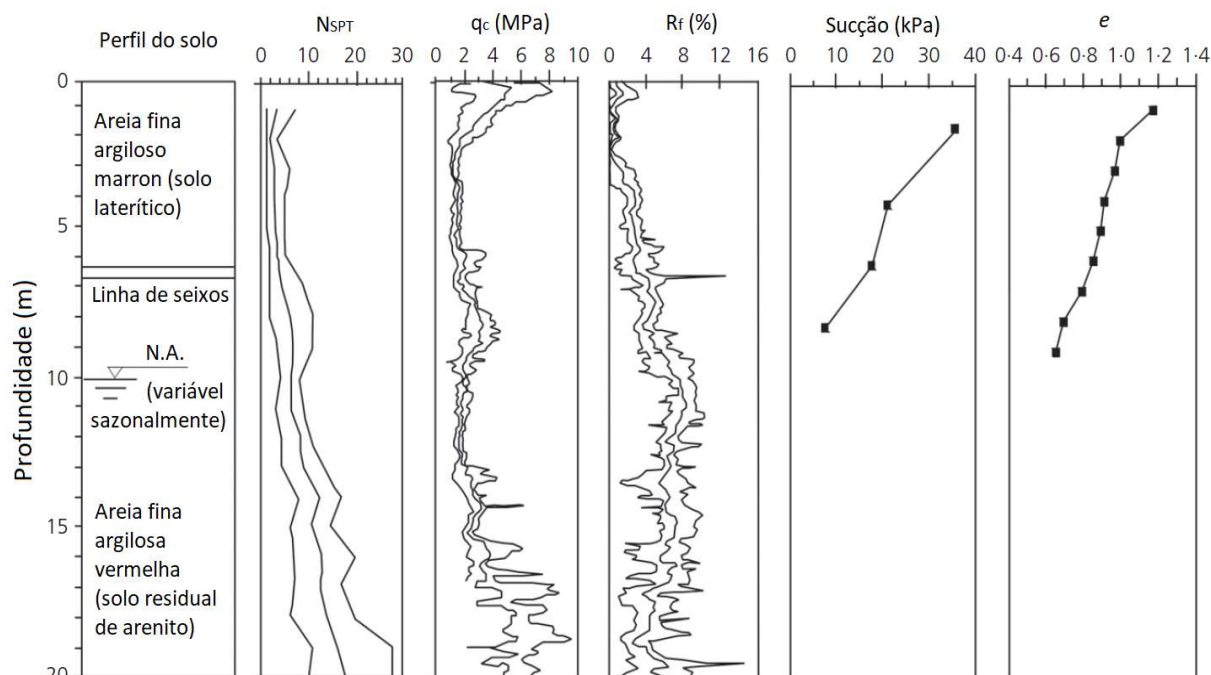


Figura 4.27: Resultado de ensaios *in situ* Área 3 (MACHADO e VILAR, 2002).

Tabela 4.5: Frações granulométricas dos solos da Área 3 (MACHADO, 1998).

Profundidade (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
3,0	60,08	11,9	27,3
5,0	66,7	5,90	27,4
8,0	68,9	13,7	17,4

4.7. ENSAIOS ÁREA 4

A Área 4 fica localizada na zona rural da cidade de Barreirinhas-MA, estando distante 23 km da sede do município, aproximadamente, sob as coordenadas geográficas 2° 54' 17" (S) e 42° 57' 52" (O). A Figura 4.28 apresenta a posição do local em relação à sede do município e algumas rodovias importantes da região. De acordo com Veiga Júnior (2000) e Sousa et al. (2012), a região é superficialmente formada por depósito de sedimentos eólicos, com matriz arenosa quartzosa de granulometria fina a média, bem selecionadas, do período Quaternário.



Figura 4.28: Localização da Área 4 em relação a cidades próximas e rodovias (GOOGLE EARTH, 2019).

A caracterização do solo local foi feita por meio de uma sondagem à percussão até 12,0 m de profundidade. O perfil é composto por uma camada de areia fina, sem presença de nível d'água. A Figura 4.29 apresenta os valores dos índices N_{SPT} em profundidade e a

Figura 4.30 apresenta a planta de locação das estacas ensaiadas e de reação (utilizadas nos ensaios à compressão) e da sondagem de referência.

Nesta área foram realizadas 9 instalações (sendo três de reação para as provas de carga à compressão) e 6 provas de carga, tendo sido as estacas divididas em dois grupos (G11 e G12). Os grupos G11 e G12 foram compostos por uma estaca tipo REF, uma do tipo INJ e uma do tipo INJ-S, totalizando três elementos em cada grupo. As estacas do grupo G11 foram ensaiadas à tração e as do grupo G12 à compressão. Todas as estacas ensaiadas foram do modelo 3H-88 e as instalações foram feitas de modo a se obter um T_M da ordem de 12,90 kN.m (9.500 lbf.ft). Esse era o torque de projeto da obra onde os testes foram realizados. As estacas da obra tinham esta mesa composição. Para realização de cada um dos ensaios de compressão, foram utilizadas duas estacas de reação. O par de estacas de reação foi composto

por uma estaca do grupo G11 (já ensaiada) e uma outra, instalada somente para servir como reação. A Tabela 4.6 resume as estacas pertencentes aos grupos G11 e G12.



Figura 4.29: Sondagem representativa da Área 4.

Tabela 4.6: Resumo das estacas dos grupos G11 e G12 instaladas e ensaiadas na Área 4.

Estacas G11	Estacas G12
REF-01-3H-88-T-G11	REF-01-3H-88-C-G12
INJ-01-3H-88-T-G11	INJ-01-3H-88-C-G12
INJ-S-01-3H-88-T-G11	INJ-S-01-3H-88-C-G12

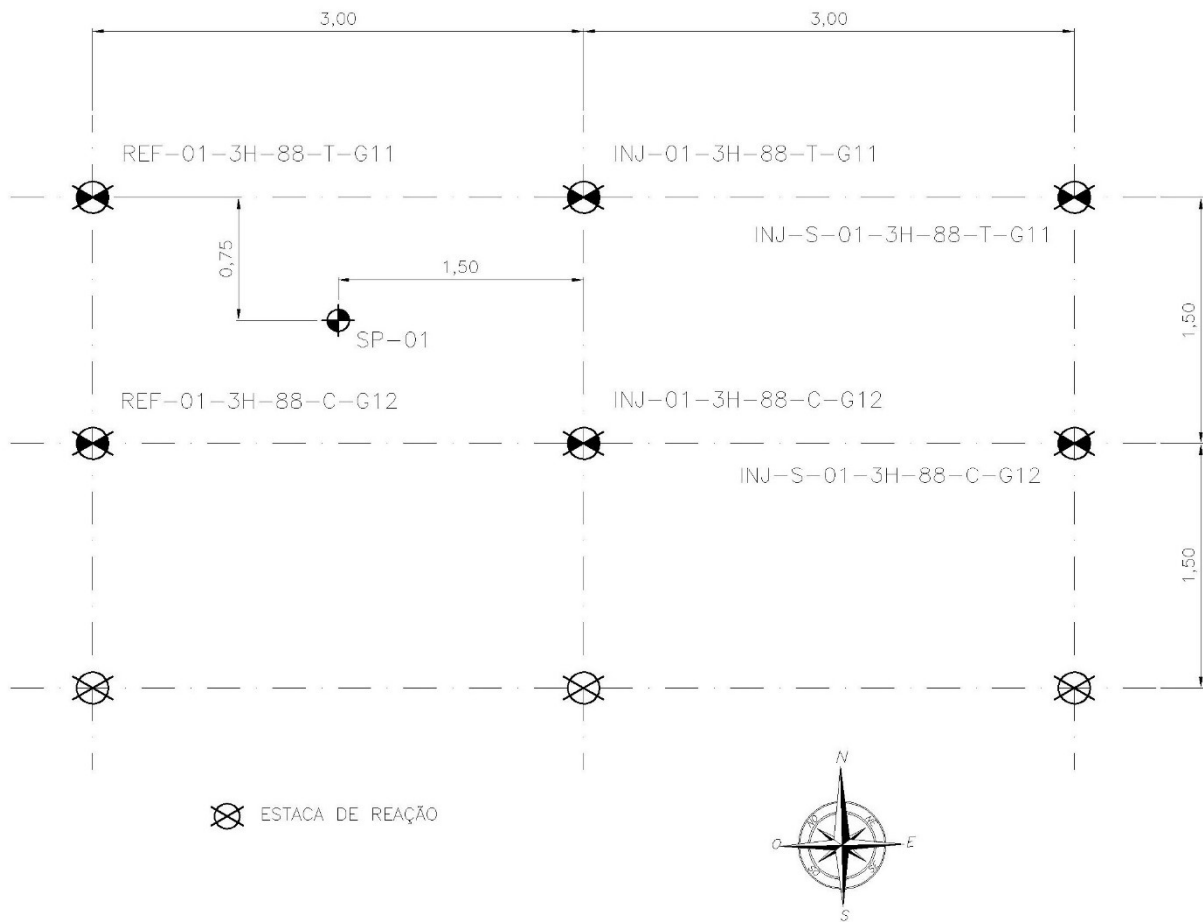


Figura 4.30: Localização das estacas ensaiadas e da sondagem de referência da Área 4 (medidas em metro).

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios, executados conforme descrito no Capítulo 4. Os resultados são apresentados separados por local de realização, Áreas 1 a 4 (itens 5.1 e 5.4, respectivamente) e posteriormente é feita uma análise integrada de todos resultados.

5.1. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 1

A Figura 5.1 apresenta os registros de torque de instalação das 6 estacas helicoidais executadas no Campo de Fundações do CRHEA, em Itirapina-SP. As estacas foram dos modelos 4H-88 e 6H-88, correspondendo aos Grupos G1 e G2, respectivamente. Os comprimentos médios de instalação foram de 9,83 m (e COV de 6%) para as estacas do grupo G1 e de 8,50 m (e COV de 6%) para as do grupo G2. Os torques finais médios foram de 9,32 kN.m (e COV de 2%) e de 9,25 kN.m (e COV de 5%) para os grupos G1 e G2, respectivamente. As estacas foram instaladas em ângulo de 40° com a vertical.

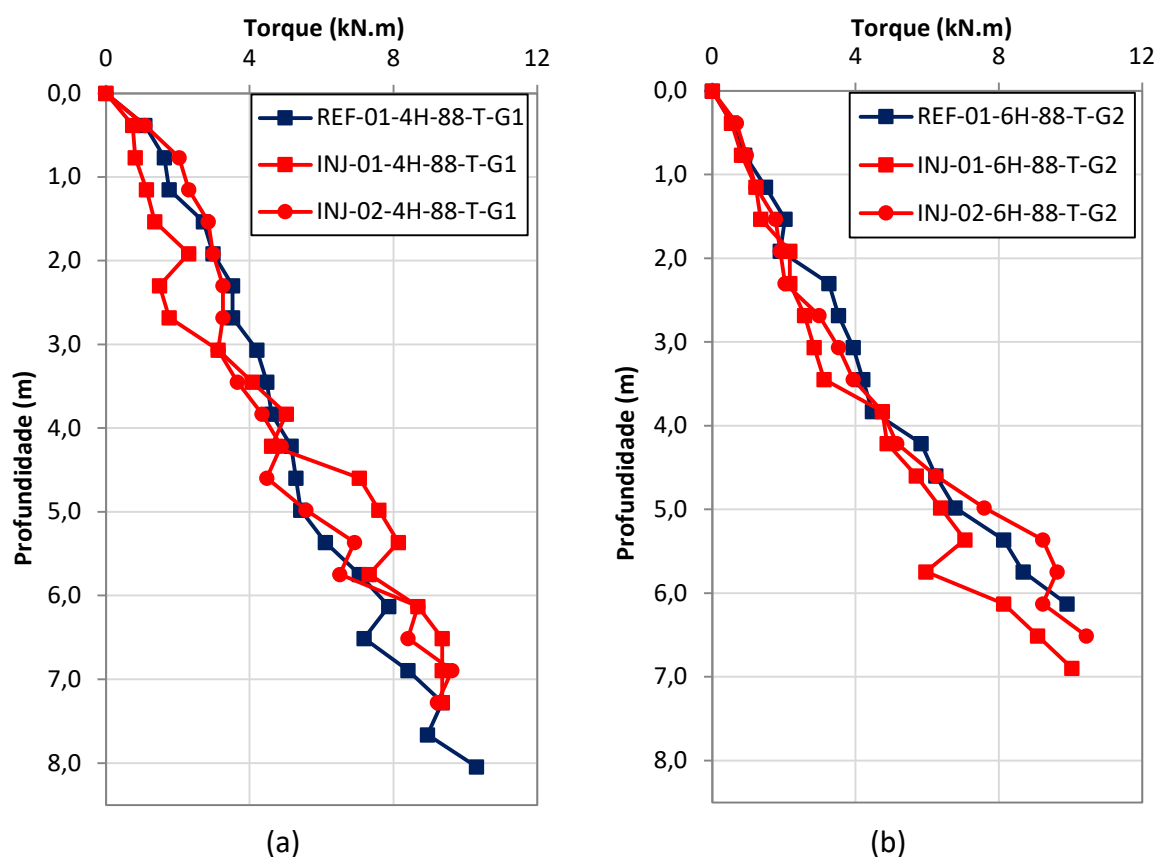


Figura 5.1: Torque desenvolvido na instalação *versus* profund. das estacas dos Grupos G1 (a) e G2 (b).

As Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga à tração realizadas nas seis estacas dos dois grupos. Os ensaios partiram de uma carga de ajuste de 50 kN, conforme apresentado no item 4.3.

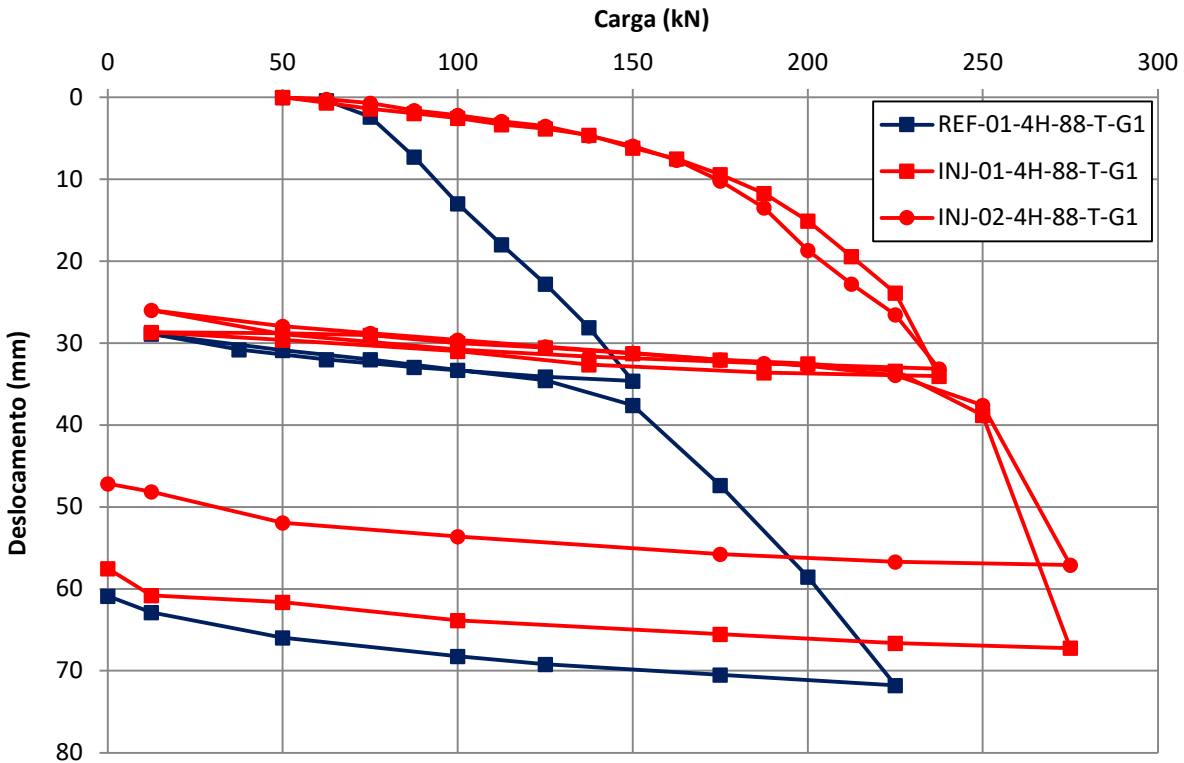


Figura 5.2: Curvas carga *versus* deslocamento das estacas do grupo G1.

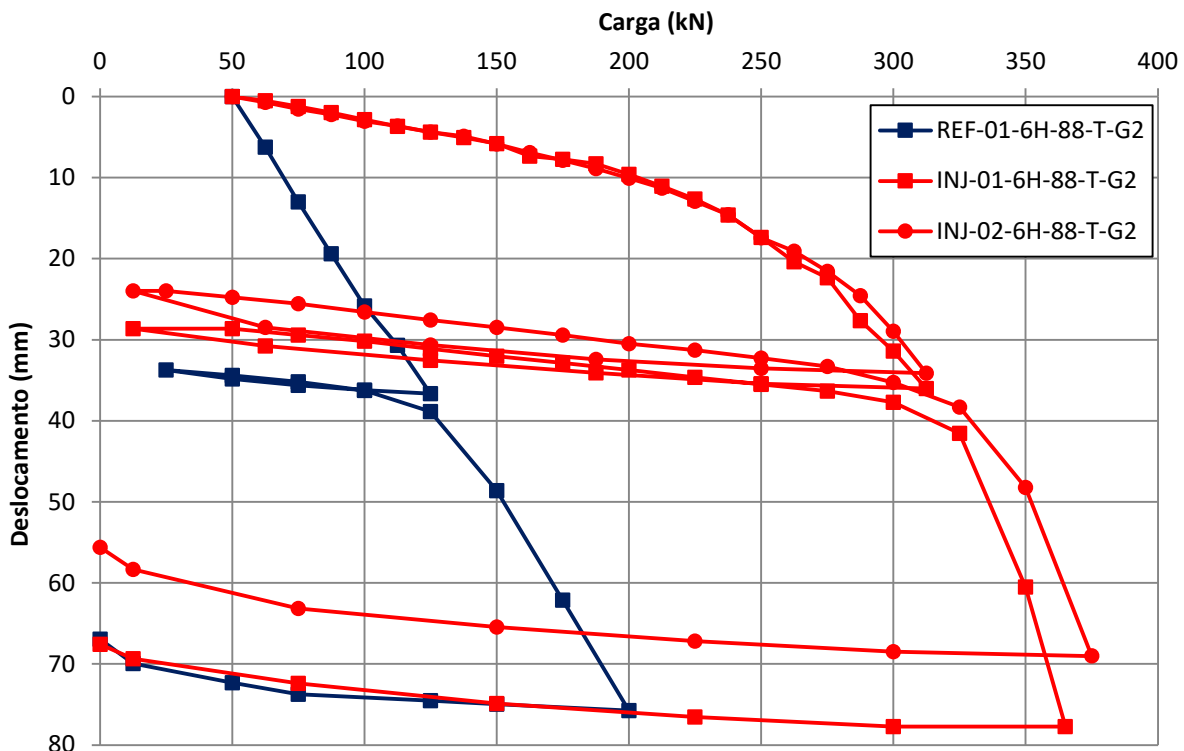


Figura 5.3: Curvas carga *versus* deslocamento das estacas do grupo G2.

A injeção (sem uso de obturador inflável) foi realizada um dia após a instalação, executada conforme procedimento descrito no Capítulo 3, sendo que a estaca de referência de cada grupo não foi injetada. As provas de carga tiveram início 11 dias após a instalação e injeção. As capacidades de carga (Q_U) foram definidas como a carga correspondente a um deslocamento de 8% do diâmetro da maior hélice mais o deslocamento devido a deformação elástica da haste (critério de Livneh e El Naggar, 2008). A Tabela 5.1 resume os dados obtidos nos ensaios realizados na Área 1, onde L é o comprimento instalado de cada uma das estacas.

Tabela 5.1: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas dos grupos G1 e G2.

Estaca	L (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-4H-88-T-G1	10,5	9,53	-	146	15,0
INJ-01-4H-88-T-G1	9,5	9,36	4,5*	238	24,9
INJ-02-4H-88-T-G1	9,5	9,09	4,5*	241	25,9
REF-01-6H-88-T-G2	8,0	8,91	-	113	12,4
INJ-01-6H-88-T-G2	9,0	9,09	5,0*	312	33,6
INJ-02-6H-88-T-G2	8,5	9,76	5,0*	316	31,7

* Calda extravasou na superfície do terreno;

Observando as curvas carga *versus* deslocamento nota-se que há boa similaridade de comportamento entre as estacas idênticas injetadas (do mesmo grupo), indicando que há boa repetibilidade do processo. Os volumes injetados nas estacas de seis hélices foram ligeiramente superiores aos das estacas de quatro hélices, indicando que a maior quantidade de hélices causa maior perturbação ao terreno durante a instalação.

Como mostrado na Tabela 5.1, os valores de capacidade de carga obtidos para as estacas convencionais (sem injeção) não aumentam com o número de hélices. Por causa do efeito perturbador da penetração da hélice no solo durante a instalação, é muito comum observar na prática que estacas de 4 e de 6 hélices, instaladas no mesmo terreno, apresentam capacidade de carga a tração similar. Isto ocorre porque o solo acima das duas hélices superiores de uma estaca de 6 hélices foi cortado por hélices 5 e 6 vezes, portanto perdeu

consideravelmente a sua resistência e praticamente estas hélices superiores não contribuem para a capacidade de carga em tração da fundação. No entanto, quando as estacas de 4 e de 6 hélices são injetadas com calda de cimento, todo o solo penetrado/perturbado é melhorado pela calda, pois esta preenche a trajetória de vazios deixada no solo penetrado pela hélice (ver Figura 3.21), e portanto, neste caso quanto maior o número de hélices, maior será a capacidade de carga em tração, como mostra a Tabela 5.1.

A partir dos dados da Tabela 5.1, considerando-se os valores médios para as estacas injetadas, nota-se que a injeção proporcionou incremento de 64% e 178% nas capacidades de carga para as estacas de 4 e 6 hélices ensaiadas na Área 1, respectivamente. Com relação aos K_t 's (razão entre capacidade de carga e torque final de instalação), os incrementos foram de 70% e 163% para as estacas dos grupos G1 (4 hélices) e G2 (6 hélices), respectivamente.

Estes primeiros resultados obtidos nesta pesquisa, em uma área onde o solo é muito poroso e frágil, foram promissores. Além de apresentar repetitividade do procedimento testado e aumento considerável de capacidade de carga, os resultados mostraram que a técnica de injeção de calda de cimento foi eficiente na melhoria do comportamento carga-recalque das estacas como mostram as Figuras 5.2 e 5.3.

5.2. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 2

Os ensaios realizados na Área 2, localizada em Betim-MG, foram divididos em duas campanhas com critérios de instalação e injeção distintos. Nesta área experimental todas as 18 estacas foram instaladas na vertical e ensaiadas em tração.

5.2.1. Primeira campanha

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os registros de torque de instalação das estacas modelos 4H-101, 6H-101, 4H-88 e 6H-88, que correspondem aos grupos G3 a G6, respectivamente. Os comprimentos médios de instalação foram de 12,33 m (e COV de 10%), 12,17 m (e COV de 9%), 12,50 m (e COV de 8%) e 11,83 m (e COV de 6%), para cada grupo, respectivamente. Os torques finais médios foram de 17,58 kN.m (e COV de 9%), 17,55 kN.m (e COV de 9%), 14,13 kN.m (e COV de 4%) e 13,98 kN.m (e COV de 8%) para os grupos G3 a G6, respectivamente. As curvas semelhantes de torque de instalação destacam a similaridade das condições de solo da

fundação para todas as 12 estacas instaladas neste terreno. Esta homogeneidade horizontal do terreno é fundamental para se avaliar e comparar os resultados obtidos em estacas helicoidais convencionais (referência) com os das estacas helicoidais injetadas, ambas com as mesmas dimensões.

As Figuras 5.6 a 5.9 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga à tração realizadas nas estacas deste terreno. O procedimento de injeção, conforme descrito no Capítulo 3, foi executado 11 dias após a instalação, sendo que a estaca de referência de cada grupo não foi injetada. As provas de carga foram iniciadas 9 dias após a injeção.

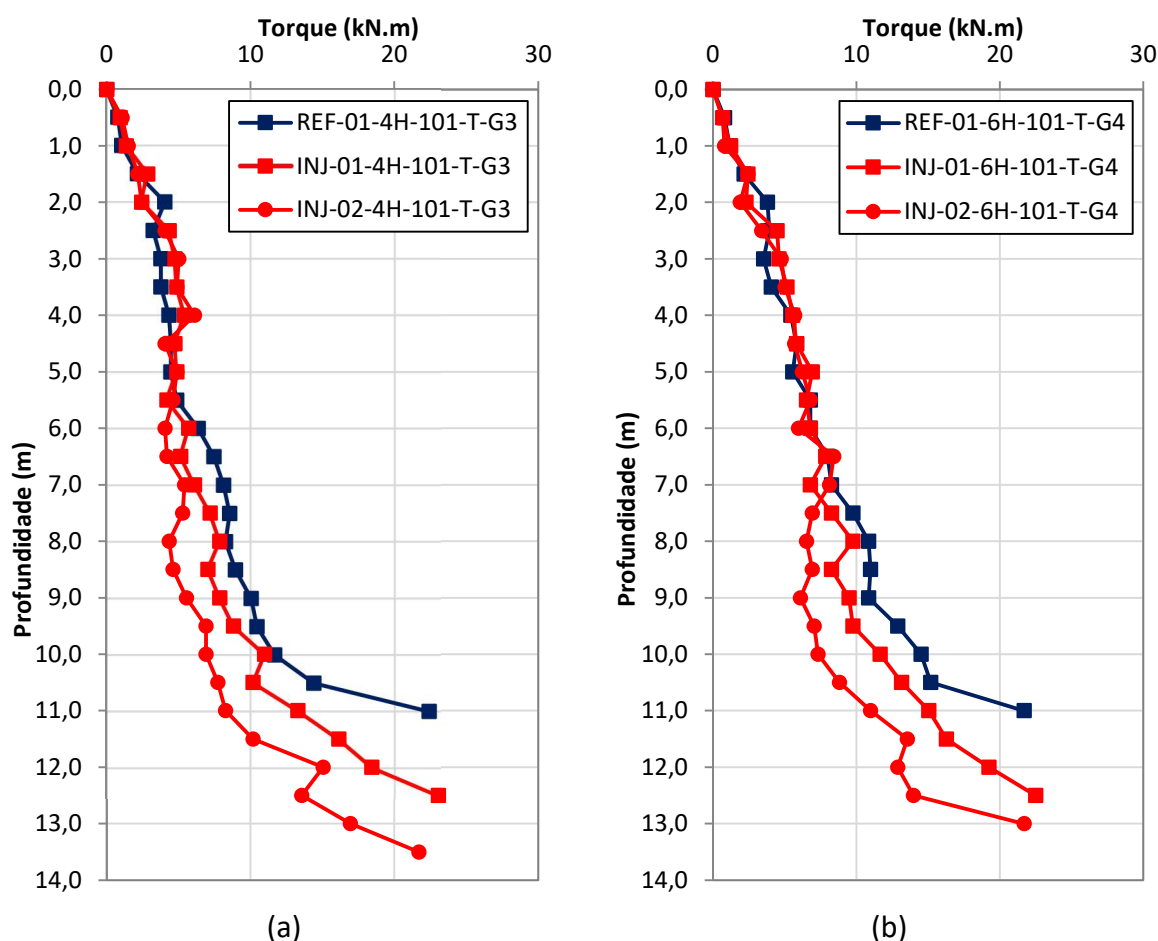


Figura 5.4: Curvas torque de instalação *versus* profundidade das estacas dos grupos G3 (a) e G4 (b).

As capacidades de carga (Q_U) foram definidas conforme descrito no item 4.3. A Tabela 5.2 resume os dados obtidos na primeira campanha de ensaios realizada na Área 2 (grupos G3 a G6).

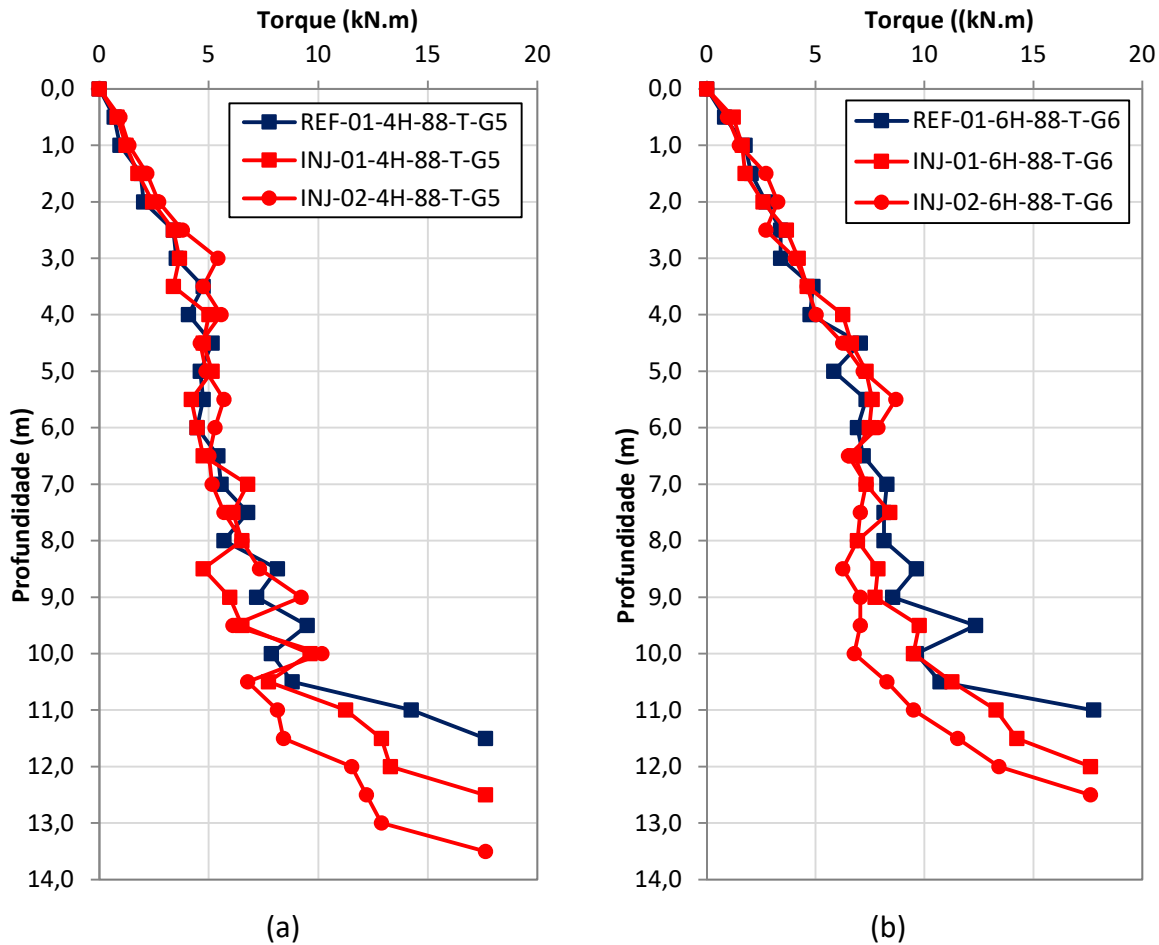


Figura 5.5: Curvas torque de instalação *versus* profundidade das estacas dos grupos G5 (a) e G6 (b).

Observando os valores médios dos comprimentos instalados, nota-se que o aumento do número de hélices de quatro para seis, embora tenha aumentado a área efetiva de hélices em 63%, não proporcionou incremento substancial no torque de instalação, visto que os comprimentos médios se mantiveram próximos. Isto deve-se ao fato de que as hélices superiores penetram um solo cada vez mais perturbado pela passagem das hélices iniciais. O fato do perfil aumentar rapidamente a sua resistência, a partir de 10 a 11 m de profundidade, também contribui para a uniformidade dos comprimentos instalados. Com relação à capacidade de carga, observa-se que as hélices superiores parecem também não contribuir significativamente e, além disso, a pequena redução no comprimento instalado é responsável inclusive por uma leve diminuição da eficiência da estaca, aferida por meio do fator de torque K_t .

Tabela 5.2: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas dos grupos G3 a G6.

Estaca	L (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-4H-101-T-G3	11,0	16,14	-	311	18,9
INJ-01-4H-101-T-G3	12,5	19,21	4,0*	520	26,5
INJ-02-4H-101-T-G3	13,5	17,40	4,0*	692	38,9
REF-01-6H-101-T-G4	11,0	17,13	-	302	17,2
INJ-01-6H-101-T-G4	12,5	19,35	6,0	621	31,4
INJ-02-6H-101-T-G4	13,0	16,18	4,0*	547	33,1
REF-01-4H-88-T-G5	11,5	13,56	-	297	21,4
INJ-01-4H-88-T-G5	12,5	14,60	6,0	563	37,7
INJ-02-4H-88-T-G5	13,5	14,24	6,0	497	34,1
REF-01-6H-88-T-G6	11,0	12,71	-	232	17,9
INJ-01-6H-88-T-G6	12,0	15,05	4,0*	627	40,7
INJ-02-6H-88-T-G6	12,5	14,20	6,0	523	36,0

* Calda extravasou na superfície do terreno;

Para as estacas modelos 4H-101 e 6H-101 (grupos G3 e G4), os dados indicam que a injeção proporcionou incremento médio de 95% e 93% nas capacidades de carga das estacas, respectivamente. Analisando-se os resultados por meio dos valores de K_t 's (razão entre capacidade de carga e torque final de instalação), os incrementos foram de 73% e 87%, para as estacas dos grupos G3 e G4, respectivamente.

Com relação às estacas modelos 4H-88 e 6H-88 (grupos G5 e G6), a partir dos dados da Tabela 5.2, considerando-se os valores médios para as estacas injetadas, nota-se que a injeção proporcionou incremento de 78% e 148% nas cargas últimas convencionadas para as estacas de quatro e seis hélices, respectivamente. Já, em termos de K_t 's, os incrementos foram de 68% e 115%. Neste terreno, como observado na Área 1, o acréscimo no número de hélices (de 4 para 6) corresponde a um acréscimo de capacidade de carga à tração quando as estacas

helicoidais são injetadas, o que não ocorre para as estacas helicoidais convencionais devido ao efeito da instalação no solo acima das hélices superiores.

Os resultados das Figuras 5.6 a 5.9 mostram que as curvas carga *versus* deslocamento de duas estacas helicoidais injetadas idênticas (mesmas dimensões e valor similar de torque final de instalação) são similares. Este fato mostra que o procedimento definido para a injeção apresenta boa repetitividade, como foi também observado nos resultados da Área 1. Além disso, estas curvas ilustram que, como observado na Área 1, a injeção de calda de cimento não apenas melhora a capacidade de carga à tração da fundação, mas também melhora o seu comportamento em serviço, reduzindo significativamente os deslocamentos da estaca quando submetida ao carregamento de serviço.

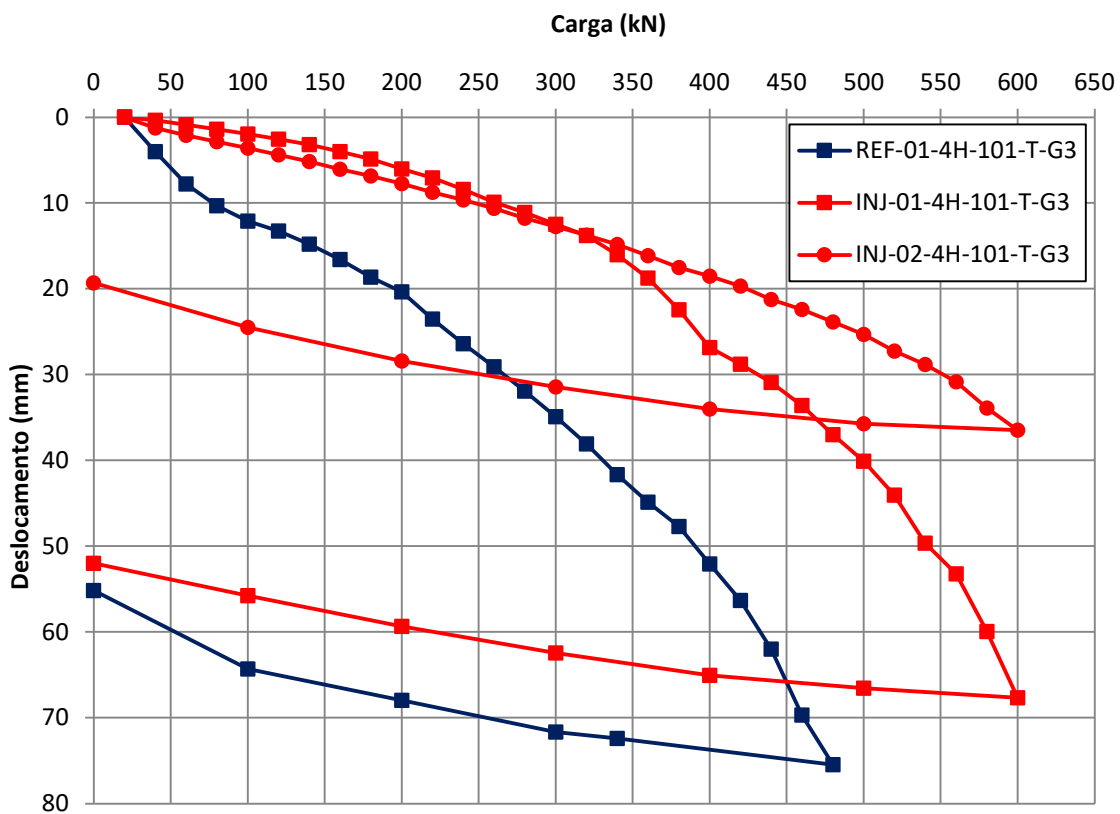


Figura 5.6: Curvas carga *versus* deslocamento das estacas do grupo G3.

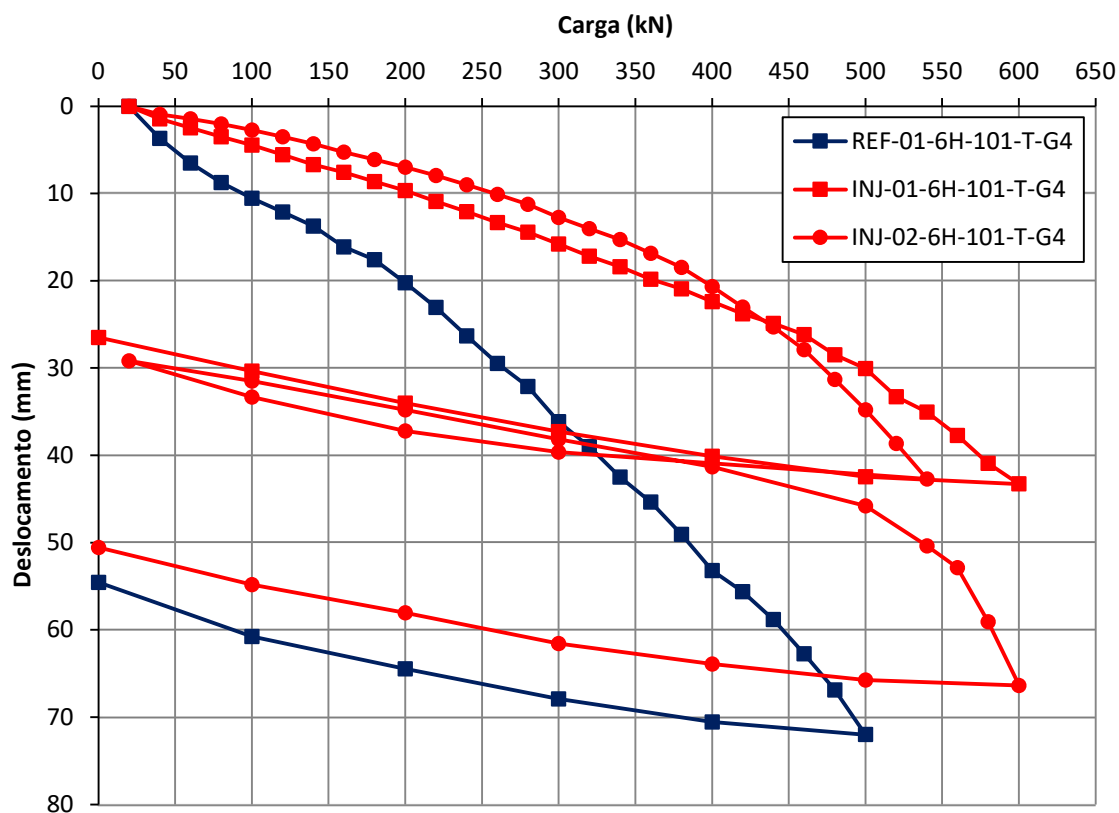


Figura 5.7: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G4.

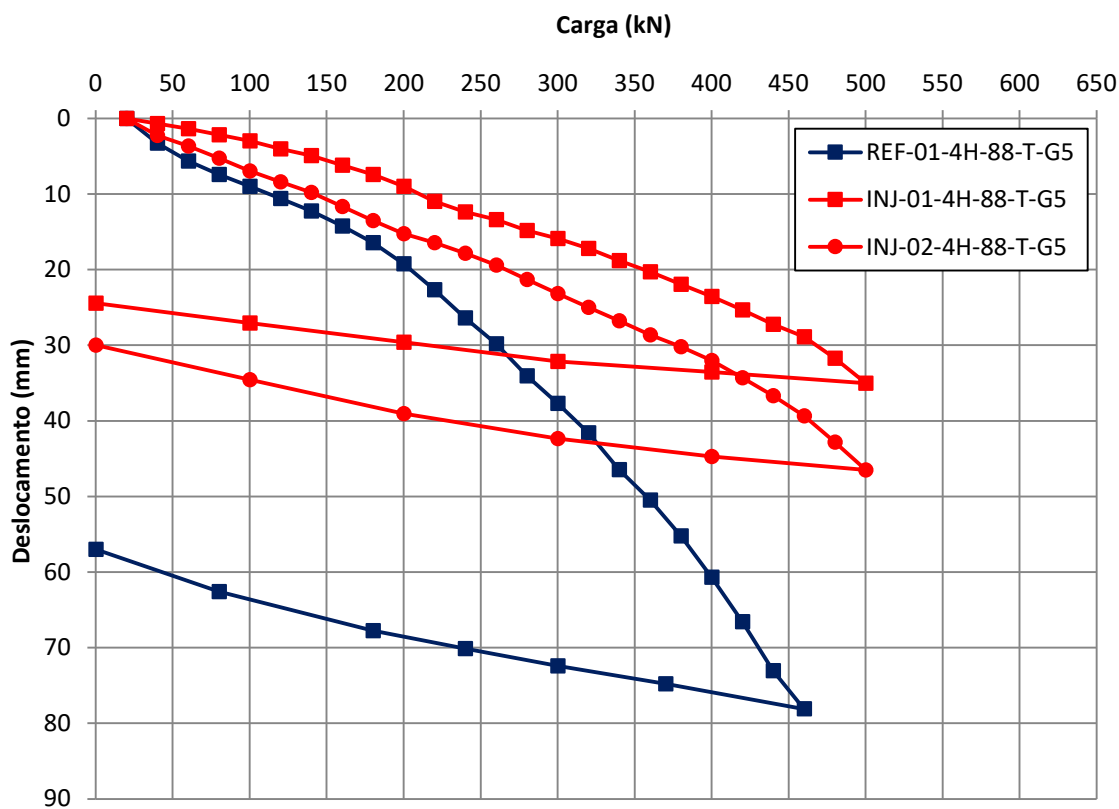


Figura 5.8: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G5.

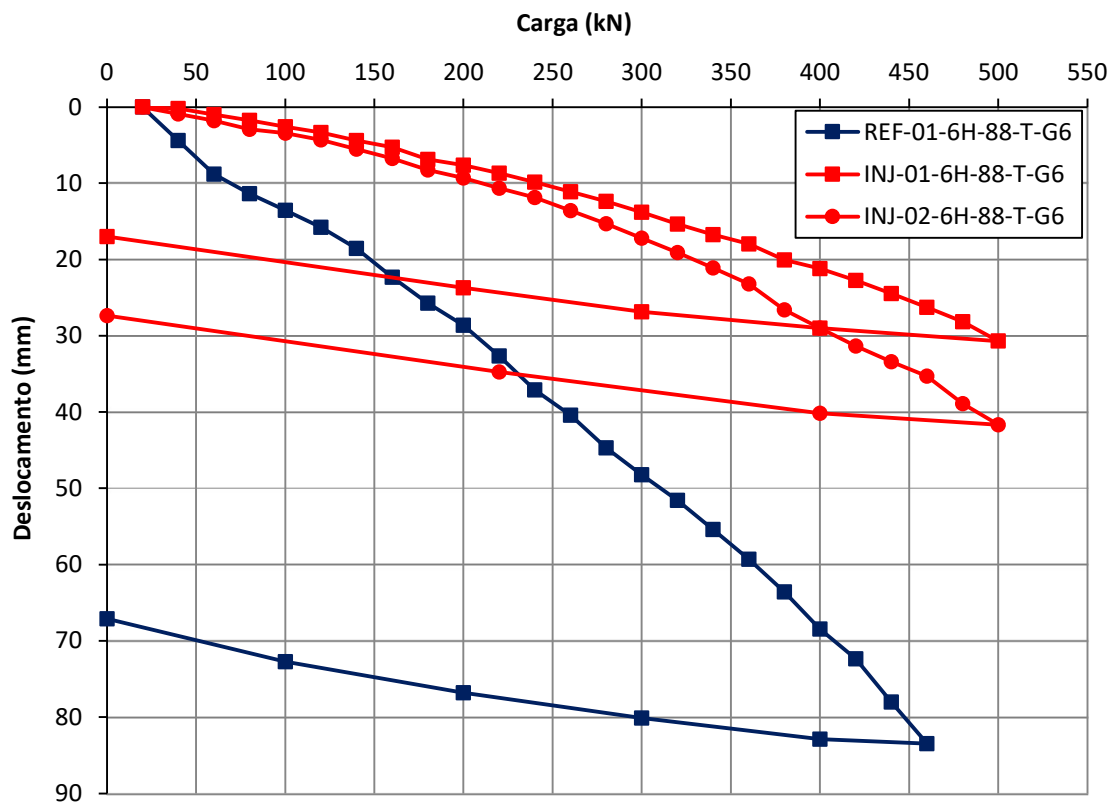


Figura 5.9: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G6.

5.2.2. Segunda campanha

Nesta segunda campanha de ensaios na Área 2 foi verificada a influência do uso de um obturador inflável, para melhorar o resultado da injeção, no comportamento das fundações por estacas helicoidais injetadas. Como comentado anteriormente neste texto, um dos objetivos da pesquisa de doutorado foi desenvolver um método executivo de injeção em estacas helicoidais com um obturador inflável que fizesse que a calda de cimento (reforço) ficasse concentrada na região das hélices, que é a zona de solo mais solicitada quando a estaca é carregada.

Portanto, ainda nesta Área 2, foi testado um outro grupo de estacas de mesma dimensão, composto por três pares de estacas: REF (sem injeção), INJ (injetadas sem obturador) e INJ-S (injetadas com obturador inflável).

A Figura 5.10 apresenta os registros de torque de instalação das estacas do grupo G7 (estacas verticais), que são do modelo 4H-88 (4 hélices, haste central de diâmetro de 88,9 mm). O comprimento médio de instalação foi de 10,92 m (e COV de 3%) e o torque final médio foi de

7,50 kN.m (e COV 3%). Esta figura mostra a similaridade do terreno de instalação das 6 estacas testadas (fundamental para comparar o ganho em comportamento dos casos injetados).

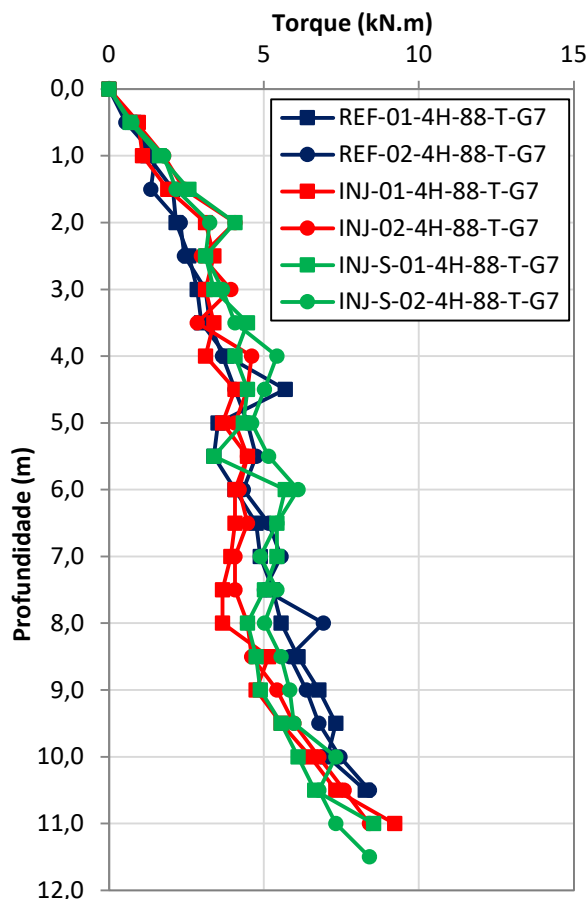


Figura 5.10: Curvas torque de instalação *versus* profundidade das estacas do grupo G7.

A Figura 5.11 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração realizadas nas estacas. As injeções, executadas conforme procedimento descrito no Capítulo 3, foram realizadas no mesmo dia das instalações das estacas. As provas de carga foram realizadas 25 dias após a execução das injeções. As estacas de referência não foram injetadas. A Tabela 5.3 resume os dados obtidos na segunda campanha de ensaios realizada na Área 2, sendo também indicada a profundidade do obturador na composição (LS).

A partir dos dados da Tabela 5.3, considerando-se os valores médios dos pares de estacas, nota-se que a injeção proporcionou incremento de 73% na capacidade de carga das estacas sem obturador. Quando o obturador foi introduzido o incremento médio foi de 166%. Em termos de K_t , o incremento foi de 71% para as estacas sem obturador e de 175% quando o obturador inálvel esteve presente. Comparando os dois pares de estacas injetadas, ou seja,

as com e as sem obturador inflável, observa-se que houve um ganho de 43% na capacidade de carga e de 61% no fator K_t .

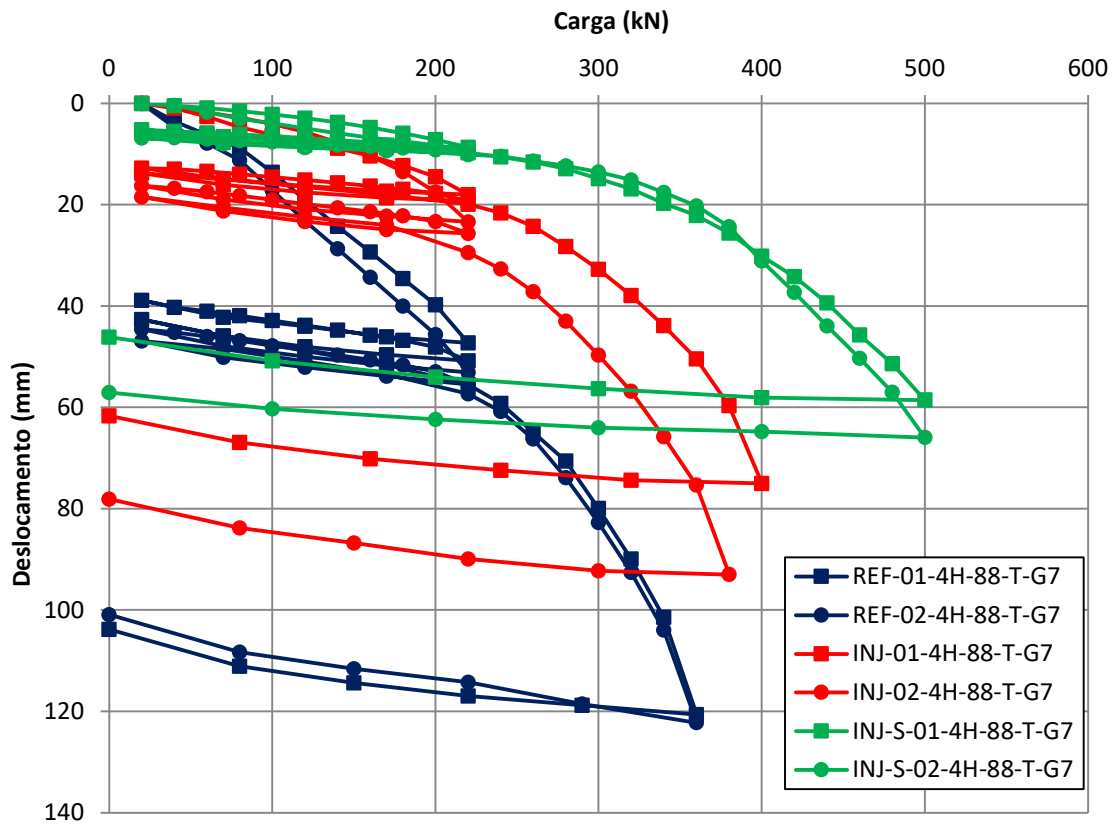


Figura 5.11: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G7.

Tabela 5.3: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G7.

Estaca	L (m)	LS (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-4H-88-T-G7	10,5	-	7,55	-	175	22,7
REF-02-4H-88-T-G7	10,5	-	7,55	-	156	20,2
INJ-01-4H-88-T-G7	11,0	-	7,69	5,0*	319	40,6
INJ-02-4H-88-T-G7	11,0	-	7,59	3,0*	255	32,8
INJ-S-01-4H-88-T-G7	11,0	5,5	7,09	6,0	477	61,6
INJ-S-02-4H-88-T-G7	11,5	5,5	7,50	6,0*	432	56,3

* Calda extravasou na superfície do terreno;

A Figura 5.11 mostra claramente que as estacas injetadas apresentam melhor comportamento carga *versus* deslocamento quando comparadas às estacas helicoidais convencionais. No entanto, comparando-se nesta mesma figura as estacas injetadas sem e com obturador, nota-se que o comportamento carga *versus* deslocamento da fundação foi ainda melhor para o caso das estacas onde a injeção foi realizada com obturador inflável. Além disso as duas estacas reforçadas com o uso do obturador apresentaram curvas carga-deslocamento praticamente idênticas, indicando boa repetibilidade do processo de injeção com obturador.

Estes primeiros resultados com o uso de obturador inflável indicaram que este procedimento aumentou a melhoria na fundação proporcionada pela injeção. Observou-se neste grupo que o volume de injeção das estacas dotadas do obturador inflável foi consideravelmente superior (50%, considerando as médias dos volumes injetados) ao das estacas injetadas sem esse dispositivo. A pressão desenvolvida durante a injeção também deve ter sido maior, embora não tenha sido medida.

5.3. PROVAS DE CARGA E EXUMAÇÃO REALIZADAS NA ÁREA 3

A Figura 5.12 apresenta os registros de torque desenvolvido durante a instalação das estacas modelo 4H-101 instaladas com 8,0 m e com 16,0 m, que correspondem aos grupos G8 e G9, respectivamente. Como os comprimentos de instalação foram fixos, houveram variações nos torques finais médios de instalação maiores que as observadas nas instalações onde o critério de paralisação da instalação foi o torque. A Área 3 fica localizada em São Carlos-SP, correspondendo ao Campo Experimental de Fundações da EESC.

As estacas do grupo G8 ficaram instaladas com um torque final médio de 5,97 kN.m (e COV de 16%) ao passo que as do grupo G9 ficaram com torque final médio de 15,46 kN.m (e COV de 7%).

Os torques de instalação do grupo G10, que foi composto por estacas modelo 6H-101 instaladas a 8,0 m de profundidade, são apresentados na Figura 5.13. Neste grupo, o torque final médio das estacas foi de 8,33 kN.m (e COV de 14%).

O procedimento de injeção, realizado conforme descrito no Capítulo 3, foi executado 2 dias após a instalação, sendo que as estacas de referência de cada grupo não foram injetadas. As provas de carga foram iniciadas 7 dias após a injeção. As Tabelas 5.4 a 5.6 resumem os dados obtidos na campanha de ensaios realizada no Área 3.

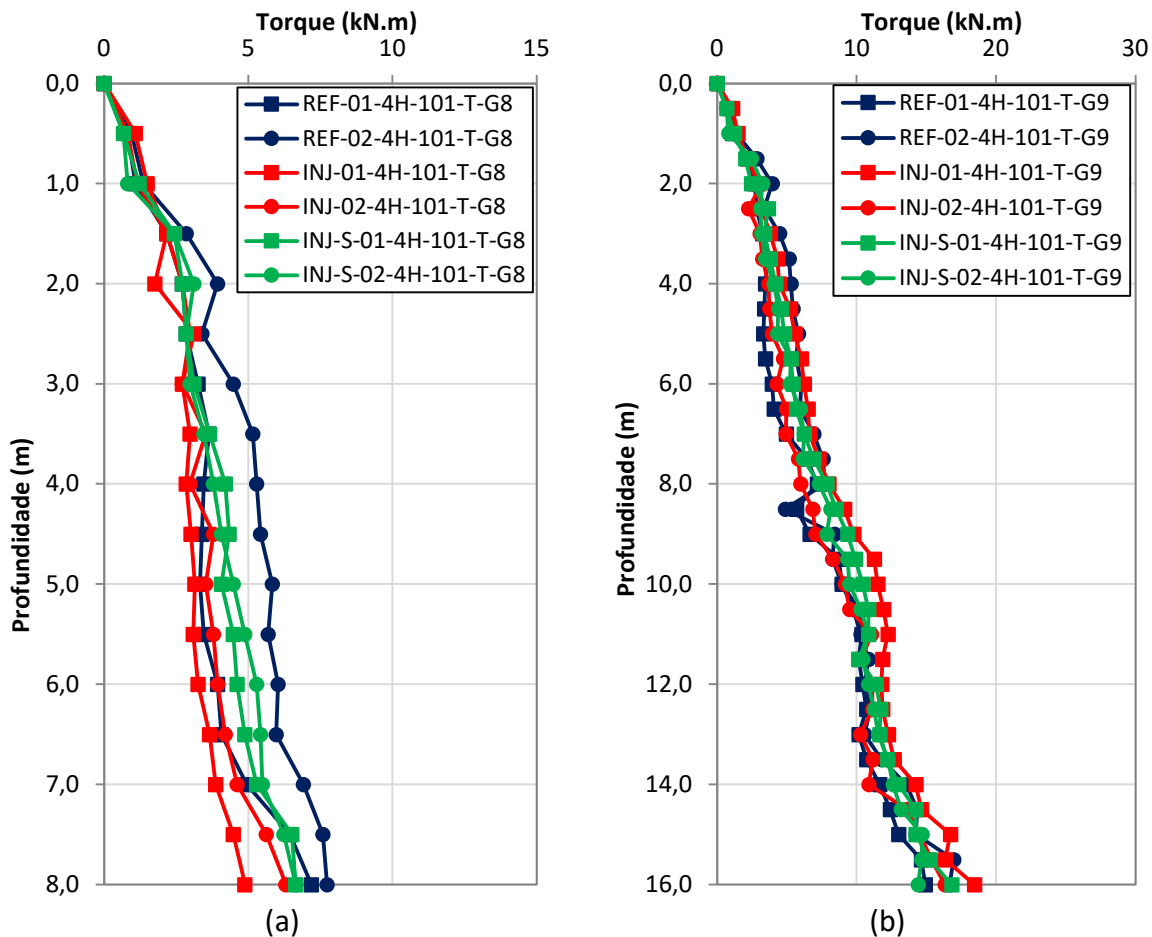


Figura 5.12: Curvas torque de instalação *versus* profundidade das estacas dos grupos G8 e G9.

As Figuras 5.14 a 5.16 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga à tração realizadas nas estacas dos grupos G8 a G10, respectivamente.

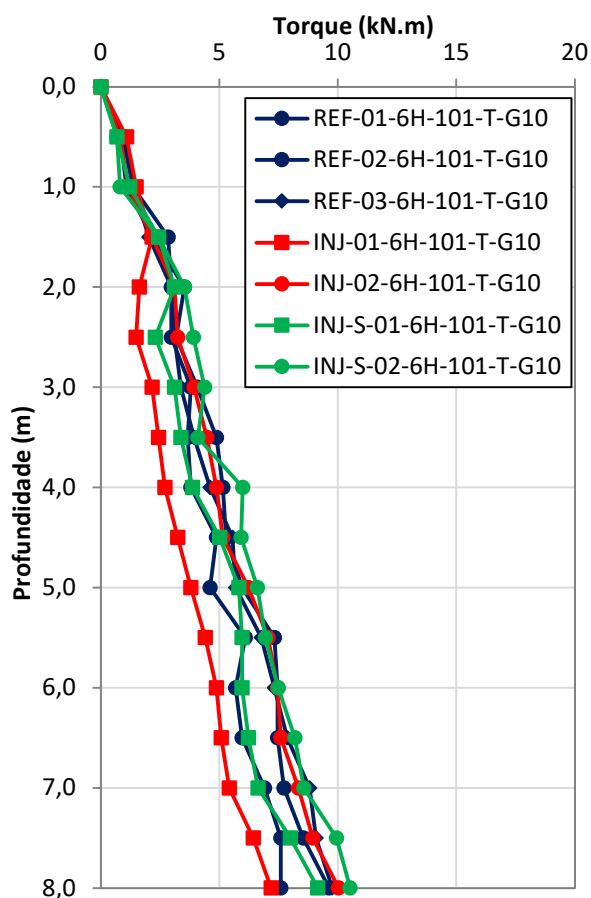


Figura 5.13: Curvas torque de instalação versus profundidade das estacas do grupo G10.

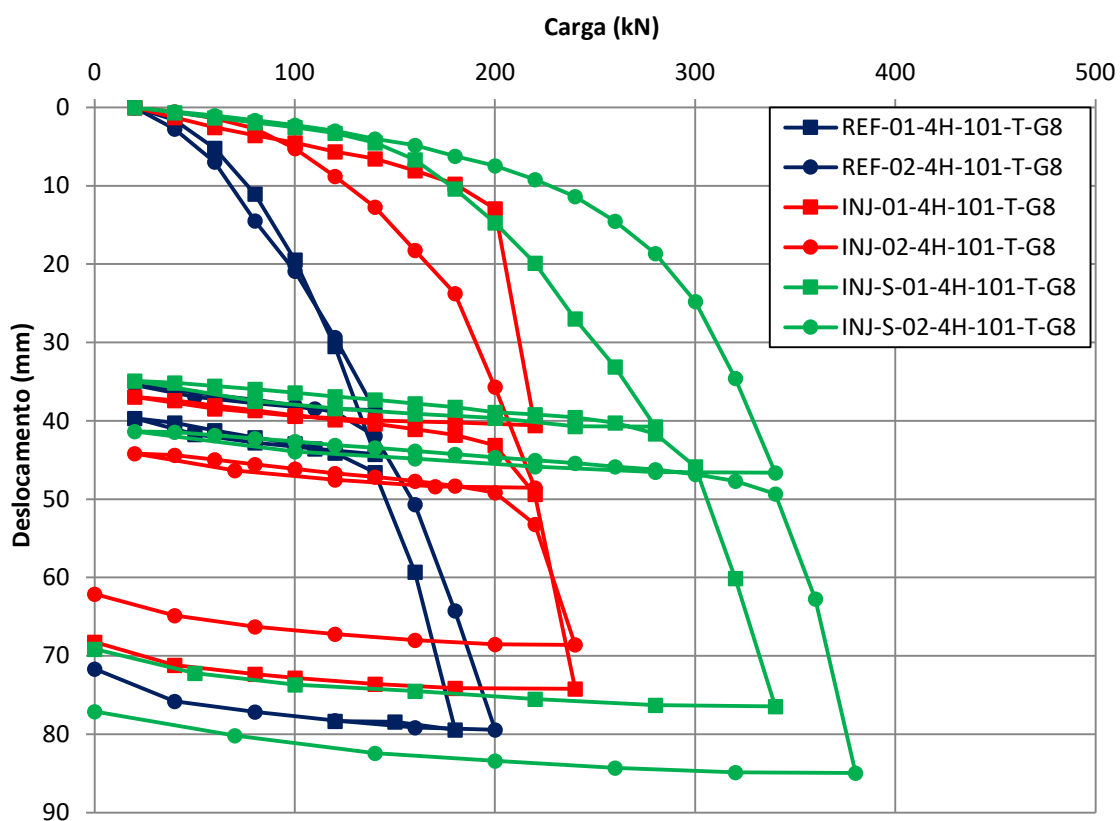


Figura 5.14: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G8.

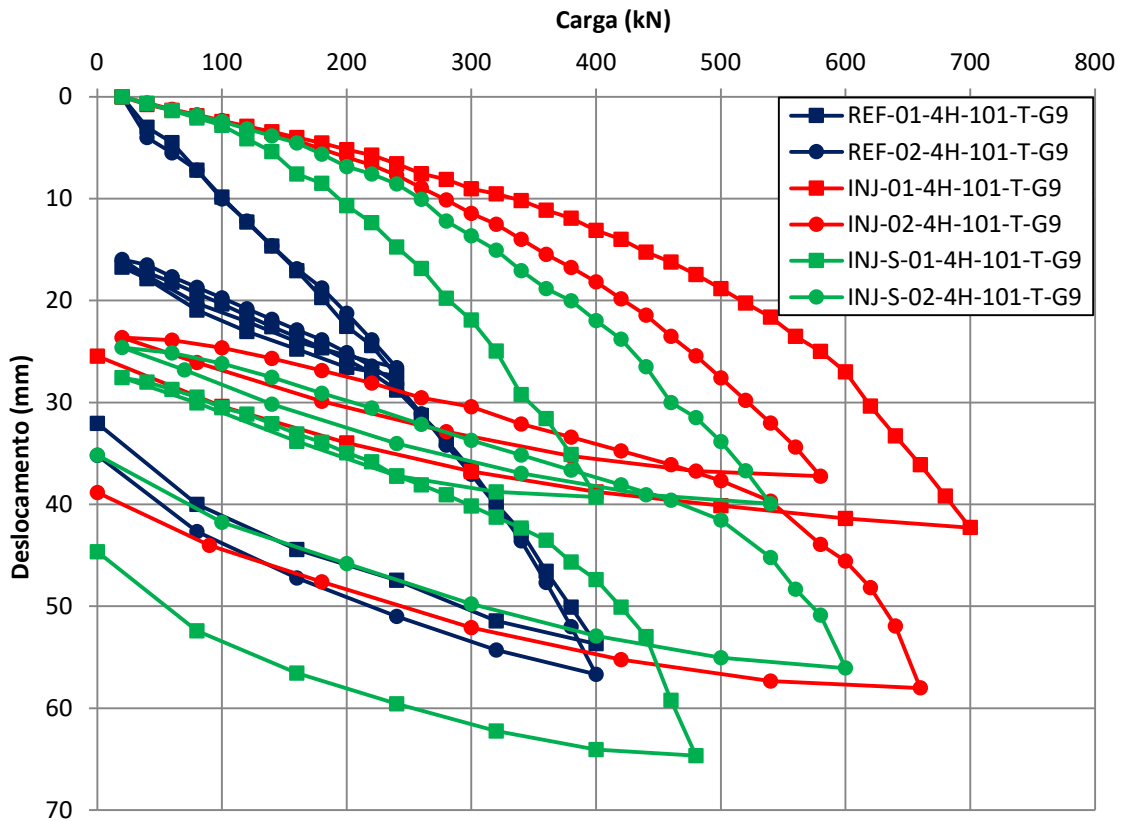


Figura 5.15: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G9.

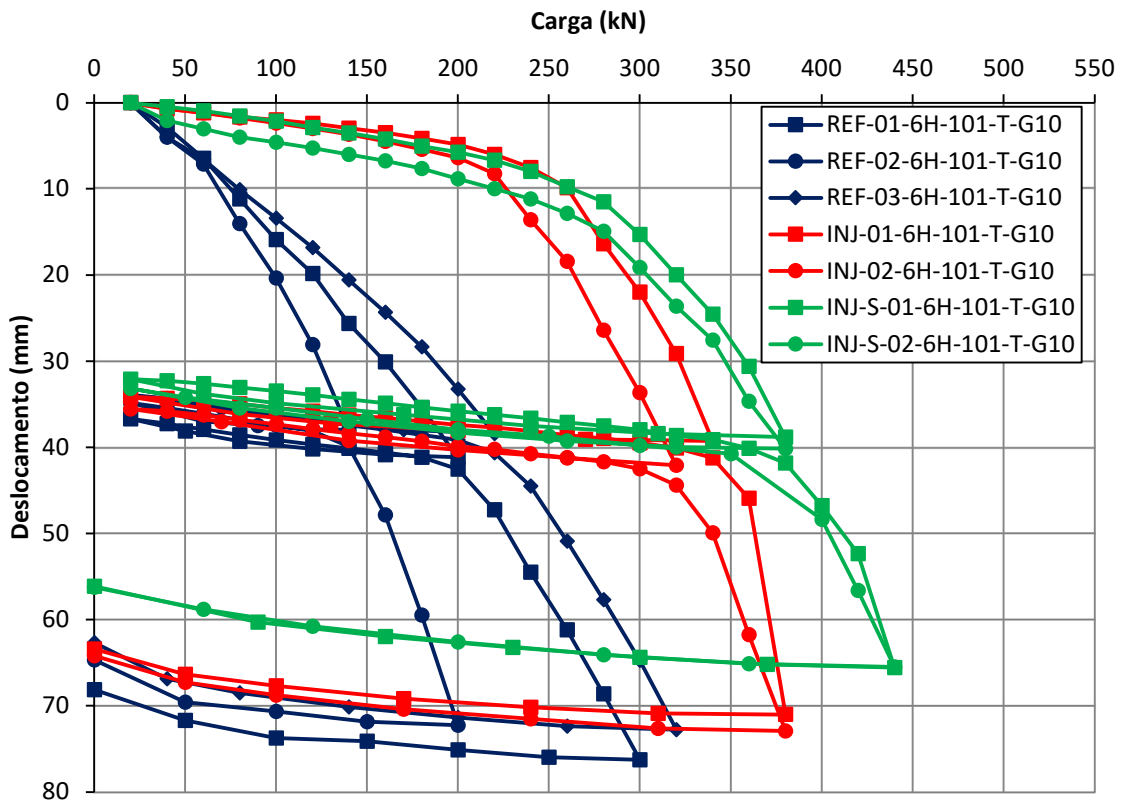


Figura 5.16: Curvas carga versus deslocamento das estacas do grupo G10.

Tabela 5.4: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G8.

Estaca	L (m)	LS (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-4H-101-T-G8	8,0	-	6,20	-	121	19,1
REF-02-4H-101-T-G8	8,0	-	7,42	-	123	16,2
INJ-01-4H-101-T-G8	8,0	-	4,41	5,0*	215	47,7
INJ-02-4H-101-T-G8	8,0	-	5,52	3,0*	195	34,6
INJ-S-01-4H-101-T-G8	8,0	2,8	6,14	3,0*	262	41,7
INJ-S-02-4H-101-T-G8	8,0	2,8	6,13	3,0*	321	51,2

* Calda extravasou na superfície do terreno;

A partir dos dados da Tabela 5.4, considerando-se os valores médios dos pares de estacas, nota-se que a injeção proporcionou incremento de 68% na capacidade de carga das estacas sem obturador inflável. Quando o obturador foi introduzido o incremento médio foi de 139%. Em termos de K_t , o incremento foi de 133% para as estacas sem obturador e de 163% quando o obturador inflável esteve presente. Comparando os dois pares de estacas injetadas, ou seja, as com e sem obturador inflável, observa-se que houve um ganho de 42% na capacidade de carga e de 13% no fator K_t .

Nota-se que o obturador inflável contribuiu positivamente com o resultado do procedimento de injeção, mesmo o volume de calda injetado nas estacas com obturador inflável não tendo sido superior ao absorvido pelas estacas sem o dispositivo, e a sua presença não tenha impedido o retorno da calda à superfície do terreno o desempenho das estacas dotadas de obturador foi superior.

Em análise dos dados apresentados na Tabela 5.5, considerando-se os valores médios dos pares de estacas do grupo G9, observa-se que a injeção proporcionou incremento de 117% na capacidade de carga das estacas sem obturador inflável. Quando o obturador foi introduzido o incremento médio foi de 53%. Em termos de K_t , o incremento foi de 100% para as estacas sem obturador e de 54% quando o obturador inflável esteve presente. Neste caso, como ilustra a Figura 5.15, as estacas injetadas com obturador tiveram um pior desempenho

comparado ao das estacas injetadas sem obturador. Este fato ocorreu devido a problemas executivos durante a injeção das estacas com obturador.

Tabela 5.5: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G9.

Estaca	L (m)	LS (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-4H-101-T-G9	16,0	-	14,20	-	326	22,5
REF-02-4H-101-T-G9	16,0	-	15,96	-	325	19,9
INJ-01-4H-101-T-G9	16,0	-	17,18	6,0*	770	43,8
INJ-02-4H-101-T-G9	16,0	-	15,40	4,0*	644	40,9
INJ-S-01-4H-101-T-G9	16,0	9,5	15,43	2,0	417	26,4
INJ-S-02-4H-101-T-G9	16,0	9,5	14,58	3,0	580	38,9

* Calda extravasou na superfície do terreno;

Durante a execução da injeção das estacas dotadas de obturador inflável do grupo G9 (INJ-S-01-4H-101-T-G9 e INJ-S-02-4H-101-T-G9), já nos primeiros momentos, foi observado comportamento atípico do sistema de injeção. O mesmo sistema fora utilizado em outras injeções nesta e em outras Áreas Experimentais. O comportamento geral do sistema indicava que a injeção ocorria de forma demasiadamente forçada e com vazão inferior ao considerado como normal, chegando mesmo a algumas paradas completas da bomba durante a injeção da estaca INJ-S-01-4H-101-T-G9.

Frente às ocorrências, o procedimento de injeção foi paralisado nestas duas estacas antes que tenham sido injetados os seis sacos de cimento ou ocorrido o retorno de calda a superfície do terreno, que são os critérios de paralisação, conforme descrito no item 4.2. Desta maneira, o volume absorvido pelo par de estacas dotadas de obturador inflável foi a metade do volume absorvido pelo par de estacas injetadas sem o dispositivo, tendo estas, inclusive, apresentado desempenho inferior nas provas de carga realizadas.

Devido a este fato, procedeu-se à desinstalação das estacas INJ-S-01-4H-101-T-G9 e INJ-S-02-4H-101-T-G9 para exame. As peças onde estava montado o obturador inflável foram retiradas da composição e cortadas ligeiramente acima da posição da válvula de entrada para inspeção, onde foi possível constatar a ocorrência do entupimento das mesmas. Na inspeção, foram

encontradas limalhas de aço provenientes da execução dos furos de acoplamento das peças (na estaca INJ-S-01-4H-101-T-G9) e pedras britadas (na estaca INJ-S-02-4H-101-T-G9). A Figura 5.17 apresenta as peças inspecionadas a partir das quais foi possível constatar a ocorrência dos entupimentos.



(a)

(b)



(c)

Figura 5.17: (a) Vista interna do obturador inflável da estaca INJ-S-01-4H-101-T-G9 entupida por (b) limalha de aço. (c) Vista interna do obturador inflável da estaca INJ-S-02-4H-101-T-G9 entupida por pedras britadas.

Tabela 5.6: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G10.

Estaca	L (m)	LS (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-6H-101-T-G10	8,0	-	8,64	-	167	18,9
REF-02-6H-101-T-G10	8,0	-	7,36	-	125	16,6
REF-03-6H-101-T-G10	8,0	-	9,22	-	195	20,7
INJ-01-6H-101-T-G10	8,0	-	6,35	4,0*	332	51,2
INJ-02-6H-101-T-G10	8,0	-	9,11	6,0	303	32,5
INJ-S-01-6H-101-T-G10	8,0	1,0	7,93	3,5	372	45,9
INJ-S-02-6H-101-T-G10	8,0	1,0	9,68	2,5	365	36,9

* Calda extravasou na superfície do terreno;

A partir dos resultados da Tabela 5.6, considerando-se os valores médios dos pares de estacas do grupo G10, nota-se que a injeção proporcionou incremento de 96% na capacidade de carga das estacas sem obturador inflável. Quando o obturador foi introduzido o incremento médio foi de 127%. Em termos de K_t , o incremento foi de 123% para as estacas sem obturador e de 121% quando o obturador inflável esteve presente. Comparando os dois pares de estacas injetadas, ou seja, as com e sem obturador inflável, observa-se que houve um ganho de 16% na carga última convencionada e de 13% no fator K_t . A pequena diferença apresentada entre as estacas com e sem obturador inflável pode estar relacionada a pouca profundidade de instalação do obturador na composição.

Nota-se que o obturador inflável contribuiu positivamente com o resultado do procedimento de injeção, pois o desempenho das estacas dotadas do dispositivo foi superior, mesmo o volume de calda injetado nas estacas com obturador inflável tendo sido inferior ao absorvido pelas estacas sem o dispositivo. No caso das estacas INJ-S-01-6H-101-T-G10 e INJ-S-02-6H-101-T-G10 o obturador foi capaz de impedir o retorno de calda à superfície do terreno até a paralização da injeção. O volume de calda injetado também foi inferior ao mínimo especificado no procedimento descrito no item 4.2 devido a ocorrências similares às observadas na injeção das estacas dotadas de obturador do grupo G9.

5.3.1. Exumação das estacas

Conforme descrito no item 4.6, foram instaladas e injetadas duas estacas de duas hélices (254 e 305 mm de diâmetro) para verificação do espalhamento da calda injetada no solo, sendo uma delas dotada de obturador inflável e uma outra sem o dispositivo. As estacas foram instaladas até 3,0 m de profundidade e posteriormente injetadas, de acordo com o procedimento descrito no item 4.2. A Figura 5.18 apresenta graficamente os valores de torque desenvolvidos durante a instalação das estacas e a Tabela 5.7 resume os dados referentes a injeção e instalação.

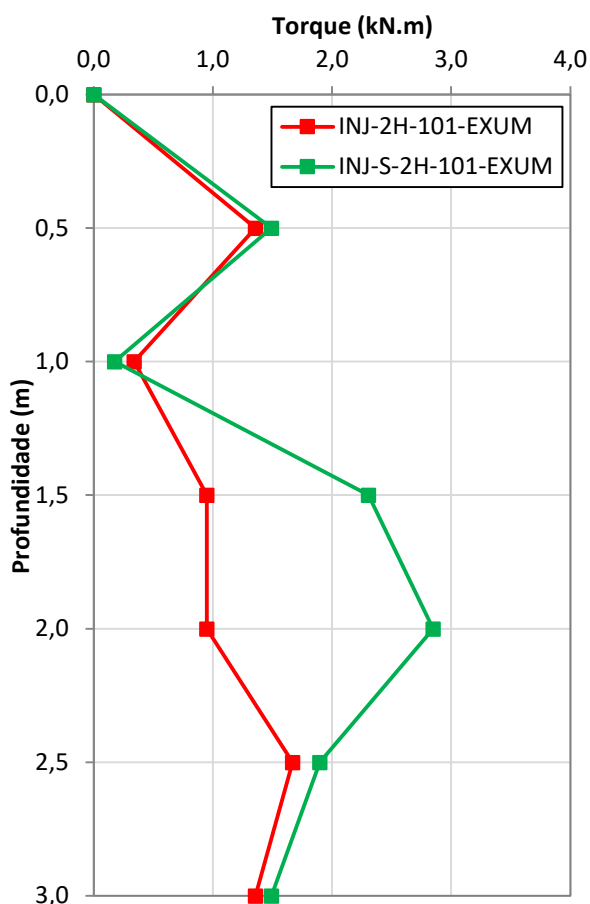


Figura 5.18: Perfil de torque desenvolvido durante a instalação das estacas destinadas à exumação.

Observando a evolução dos torques de instalação, constata-se que em ambas ocorrem picos na profundidade de 0,5 m, indicativos de que este ponto da camada superficial é mais resistente que a 1,0 m de profundidade. A penetração do obturador nesta camada superficial mais resistente é percebida pelo afastamento dos torques de instalação nas profundidades de 1,5 e 2,0 m.

Tabela 5.7: Resumo dos dados de injeção e instalação das estacas destinadas à exumação.

Estaca	L (m)	LS (m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)
INJ-2H-101-EXUM	3,0	-	1,0*
INJ-S-2H-101-EXUM	3,0	1,0	6,0*

* Calda extravasou na superfície do terreno;

A estaca sem o obturador inflável (INJ-2H-101-EXUM) foi injetada primeiro, tendo absorvido o volume correspondente a um saco de cimento de 50 kg até o momento onde se iniciou o extravasamento de calda na superfície do terreno, na interface estaca-solo, como ocorreu em todos os demais casos. Com a ocorrência, a injeção foi encerrada para esta estaca. Em seguida, foi iniciada a injeção da estaca dotada de obturador inflável (INJ-S-2H-101-EXUM). Neste caso, também ocorreu extravasamento de calda, sendo que somente após a injeção de um volume correspondente a 6 sacos de cimento de 50 kg e, diferentemente de todos os outros casos, a calda surgiu na superfície do terreno distante da estaca aproximadamente 3,0 m. Isso comprova a efetividade de funcionamento do dispositivo, cuja função é impedir que a calda de cimento suba pelo espaço vazio formado em torno da haste central da estaca.



Figura 5.19: Aspecto da estaca INJ-2H-101-EXUM ao final da injeção. Detalhe da calda extravasada na superfície, percolada pela interface estaca-solo.



Figura 5.20: Aspecto da estaca INJ-S-2H-101-EXUM ao final da injeção. Detalhe para ocorrência do extravasamento afastado da estaca.

Após o tempo de cura da calda, iniciou-se o processo de escavação para verificação do espalhamento da calda no terreno. Já nos primeiros momentos da escavação mecanizada percebeu-se a presença de fragmentos de calda endurecida misturada ao material escavado, sem que, no entanto, fosse percebida a formação de solo-cimento, indicando que a injeção se

processa por meio de fraturamento hidráulico ou preenchimento de eventual cavidade preexistente. De fato, conforme Gunaratne (2006) a granulometria do solo do Campo Experimental de Fundações da EESC e o tipo de cimento utilizado na elaboração da calda não possibilitaria a permeação e conseqüente formação de solo-cimento.

A escavação manual foi iniciada pela estaca INJ-2H-101-EXUM (sem obturador), donde se observou a formação de “placas” em forma helicoidal em praticamente todo o comprimento da estaca (Figura 5.21 (a)). As placas se formam devido ao preenchimento por calda do espaço deixado pela passagem das hélices. As placas encontradas apresentavam o mesmo diâmetro externo das hélices e uma espessura constante de 20 mm, aproximadamente (Figura 5.21 (b)). A sobresspessura em relação a espessura real da chapa de construção das hélices (12,5 mm) pode estar relacionada a imperfeição geométrica ou expansão proporcionada pelo próprio processo de injeção.

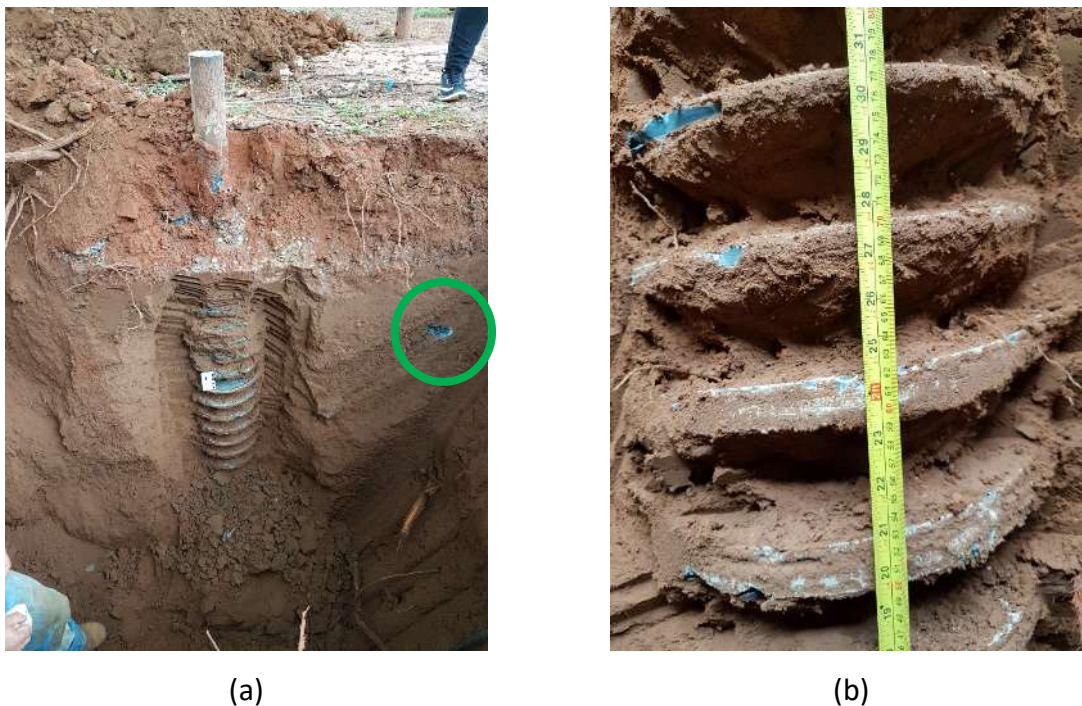


Figura 5.21: (a) Vista da porção superior (superfície do terreno até 2,0 m de profundidade) da estaca INJ-2H-101-EXUM. Em destaque, veio de calda endurecida proveniente da estaca INJ-S-2H-101-EXUM seccionado pela escavação mecanizada. (b) Detalhe das “placas” de calda endurecida.

Não foi observada a formação das placas na porção superficial (aterro), onde o material apresentava textura arenosa, com presença de pedregulhos (provavelmente brita proveniente de outros trabalhos realizados no campo experimental). Esta camada superficial

de textura arenosa pedregulhosa corresponde bem ao pico de torque de instalação apresentado na profundidade de 0,5 m em ambas as estacas. Isso indica que em solos coesivos (areia argilosa, no caso apresentado) o espaço deixado pela passagem das hélices permanece aberto, sendo passível de preenchimento pela calda injetada, ao passo que em solos não coesivos (areia com pedregulhos, no caso apresentado) isso não acontece. Não foi verificado a existência de qualquer veio de calda endurecida projetando-se para além da zona delimitada pela projeção vertical das hélices da estaca.

Com relação à estaca INJ-S-2H-101-EXUM (com obturador inflável), na região desde a ponta da estaca até a base do obturador inflável, foi observado o mesmo que na estaca INJ-2H-101-EXUM (Figura 5.22 (a)). Foi verificado também neste caso que não houve qualquer fluxo de calda para a região de solo não perturbado abaixo da ponta das estacas (Figura 5.22 (b)).



(a)



(b)

Figura 5.22: (a) Vista da porção inferior (ponta da estaca até o obturador inflável) da estaca INJ-S-2H-101-EXUM e (b) detalhe da hélice da ponta e zona abaixo da ponta, onde não foi encontrada calda de cimento endurecida.

Observou-se a formação de duas lentes subverticais (espessura de 6-10 mm, aproximadamente) a partir da base do obturador inflável e projetando-se radialmente (Figura 5.23 (a)). O ponto de onde as lentes iniciaram a propagação corresponde ao ponto de menor torque de instalação, ou seja, onde o terreno ofereceu menor resistência à penetração da estaca durante a instalação. Posteriormente, durante a injeção, neste mesmo ponto de menor resistência, se deu o início do hidrofraturamento. A orientação das lentes é compatível com o modelo clássico de propagação das fraturas, conforme comentado por Bezuijen (2010). Foram encontradas partes das lentes afastadas de até 1,0 m da estaca, aproximadamente. Embora não tenha sido possível sua manutenção para registos fotográficos, possivelmente, o veio de calda endurecida (Figura 5.21 (a)) encontrado na extremidade oposta da escavação, próximo à estaca INJ-2H-101-EXUM, tenha sido proveniente destas lentes.

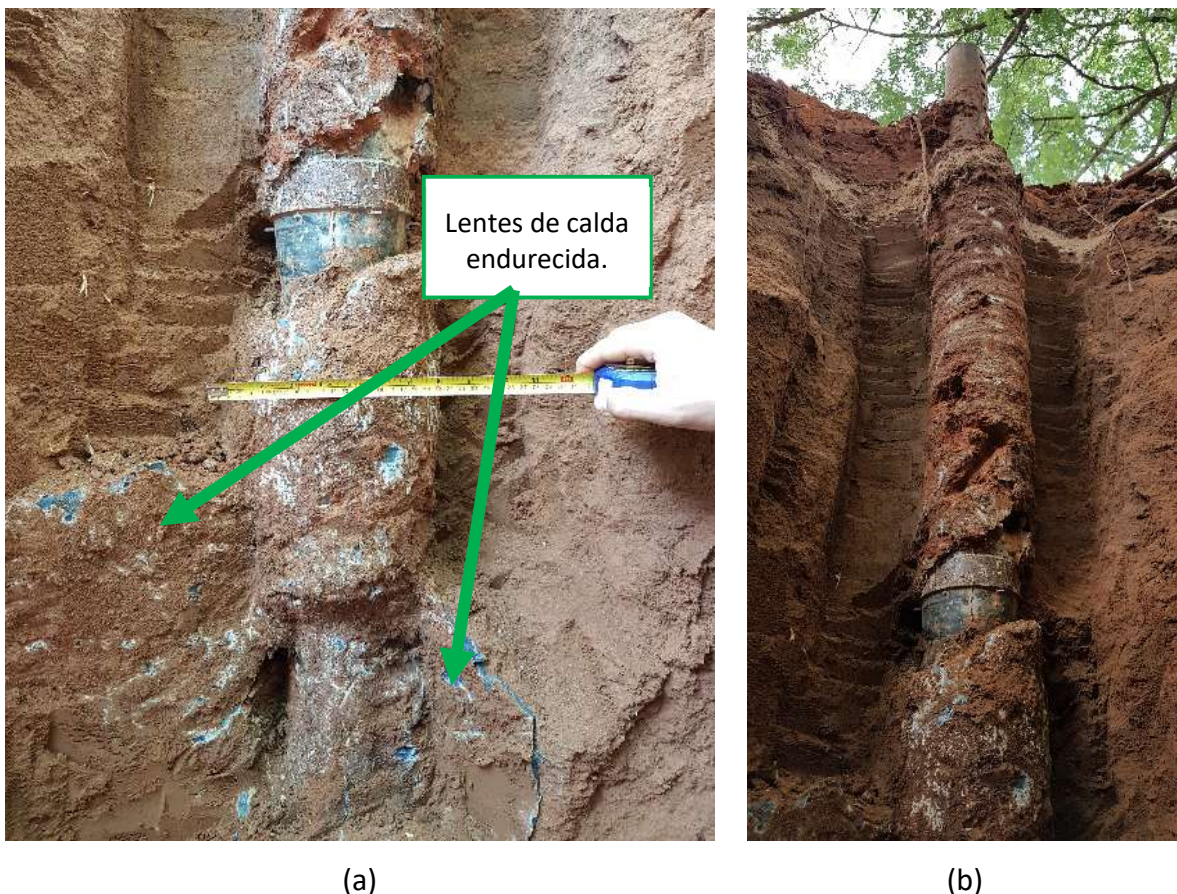


Figura 5.23: Detalhes das (a) lentes formadas junto ao obturador inflável e (b) do aspecto da zona acima do dispositivo, na estaca INJ-S-2H-101-EXUM.

Na região acima do obturador inflável não foram encontrados os característicos vazios provenientes da passagem das hélices, preenchidos ou não por calda de cimento. O

deslocamento adicional de material provocado pela introdução do obturador inflável proporciona o fechamento dos vazios em forma de helicóide deixados pelas hélices. Não foi observada grande expansão do obturador, embora, pelas características elásticas de seu material de construção (borracha) este possa ter expandido e retornado ao seu formato original com o alívio da pressão, tão logo se finalizou o processo de injeção. De qualquer forma, não há dúvida de que ele impediu o fluxo de calda pela região de solo perturbado acima de si e proporcionou aumento da pressão de injeção e do volume injetado.

5.4. PROVAS DE CARGA REALIZADAS NA ÁREA 4

Na Área 4 foram realizadas provas de carga à tração e à compressão para avaliação da influência da injeção no comportamento das fundações por estacas helicoidais nestas duas condições de carregamento. Nesta área, localizada na cidade de Barreirinhas-MA, foram executadas estacas de referência e injetadas com e sem obturador inflável.

Quando uma estaca helicoidal é carregada em tração, o solo mobilizado no carregamento é o que está acima das hélices e, portanto, tem sido penetrado por elas “n” vezes conforme a posição da hélice em análise na composição da estaca. Desta forma, o solo acima da primeira hélice (próxima à ponta da estaca) foi perturbado (modificado) uma vez, ao passo que o solo acima da segunda hélice foi perturbado duas vezes, assim sucessivamente.

Já em compressão o solo responsável pela capacidade de carga da fundação está abaixo das hélices e, desta maneira, é penetrado “n-1” vezes, conforme a posição da hélice na composição. Logo, o solo mobilizado abaixo da primeira hélice é um solo considerado intacto e, conseqüentemente, mais resistente. Por conseguinte, deve haver uma maior mobilização de carga pela hélice da ponta da estaca, o que propicia um comportamento diferente entre tração e compressão.

A Figura 5.24 apresenta os registros de torque medidos durante a instalação (vertical) das estacas modelo 3H-88 (com 3 hélices e diâmetro da haste central de 88,9 mm) instaladas para ensaios de tração e de compressão, que correspondem aos grupos G11 e G12, respectivamente. Cada grupo foi composto por uma estaca de cada tipo (REF, INJ e INJ-S), totalizando-se três estacas em cada grupo.

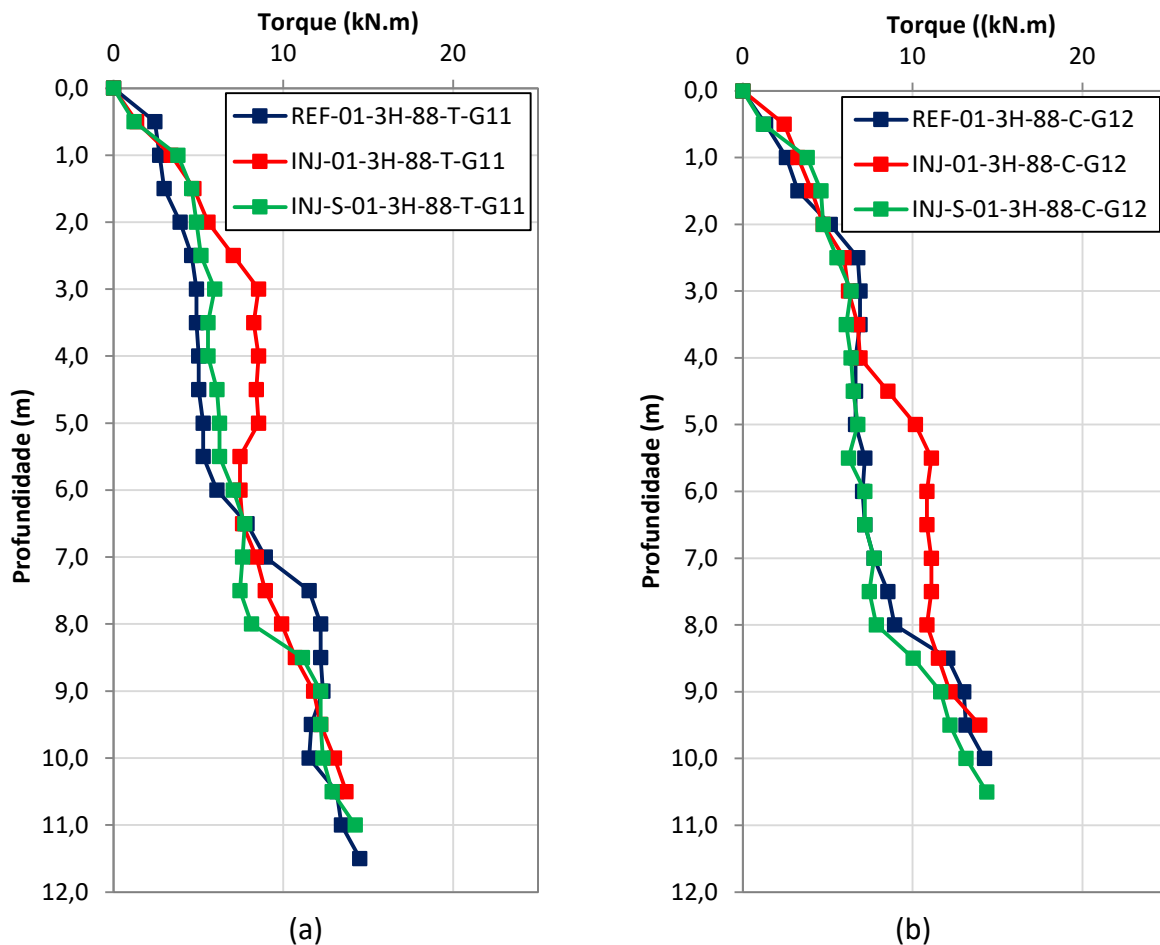


Figura 5.24: Curvas torque de instalação *versus* profundidade das estacas dos grupos (a) G11 e (b) G12.

O comprimento médio de instalação das estacas do grupo G11 foi de 11,0 m (e COV de 5%) e o torque final médio foi de 13,28 kN.m (e COV 3%). As estacas do grupo G12 foram instaladas com comprimento médio de 10,0 m (e COV de 5%) e torque final médio de 13,09 kN.m (e COV de 4%). As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas dos dois grupos executados na Área 4, respectivamente. A Tabela 5.8 resume os dados obtidos na campanha de ensaios realizada. As estacas foram injetadas um dia após a instalação e ensaiadas depois de mais sete dias. Nesta Área, o volume foi limitado ao correspondente a três sacos de cimento de 50 kg devido as estacas possuírem três hélices. Como se observou nos ensaios anteriormente realizados, o volume de calda necessário para preencher os vazios próximos à região das hélices de uma estaca de duas hélices foi o correspondente à um saco de cimento de 50 kg.

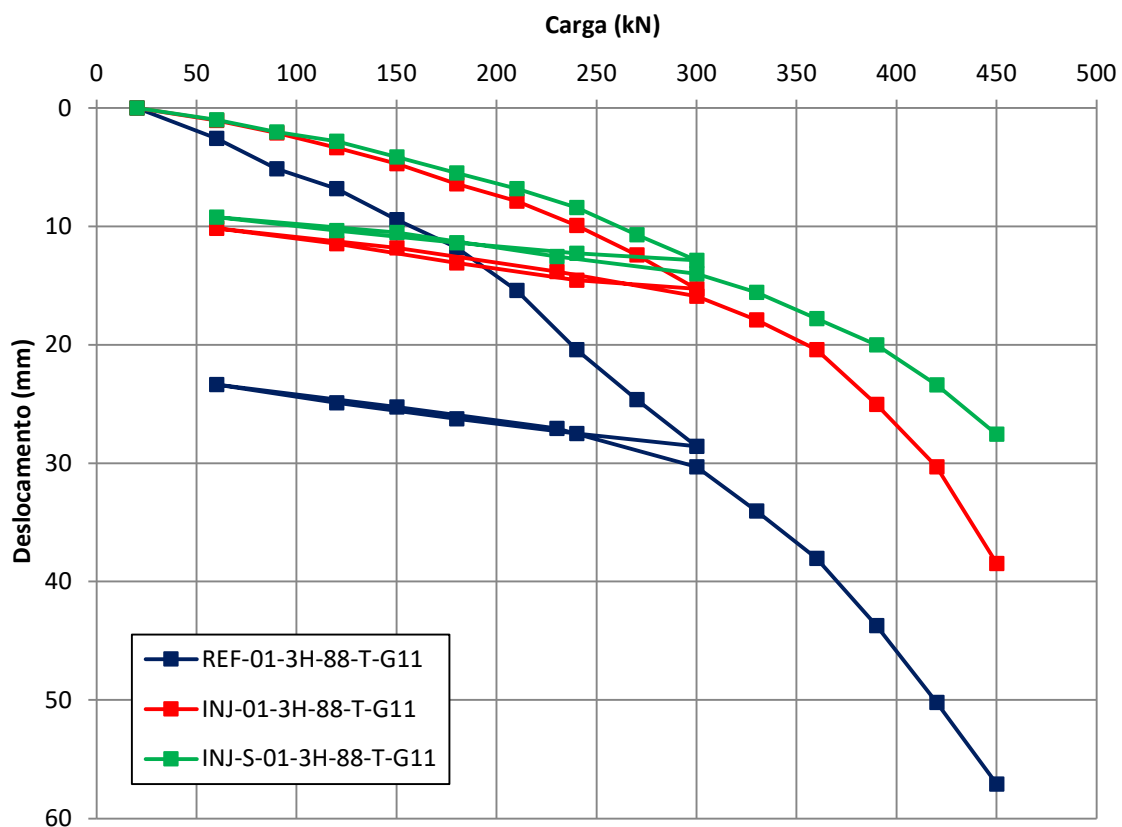


Figura 5.25: Curvas carga *versus* deslocamento das estacas do grupo G11 (carregamento de tração).

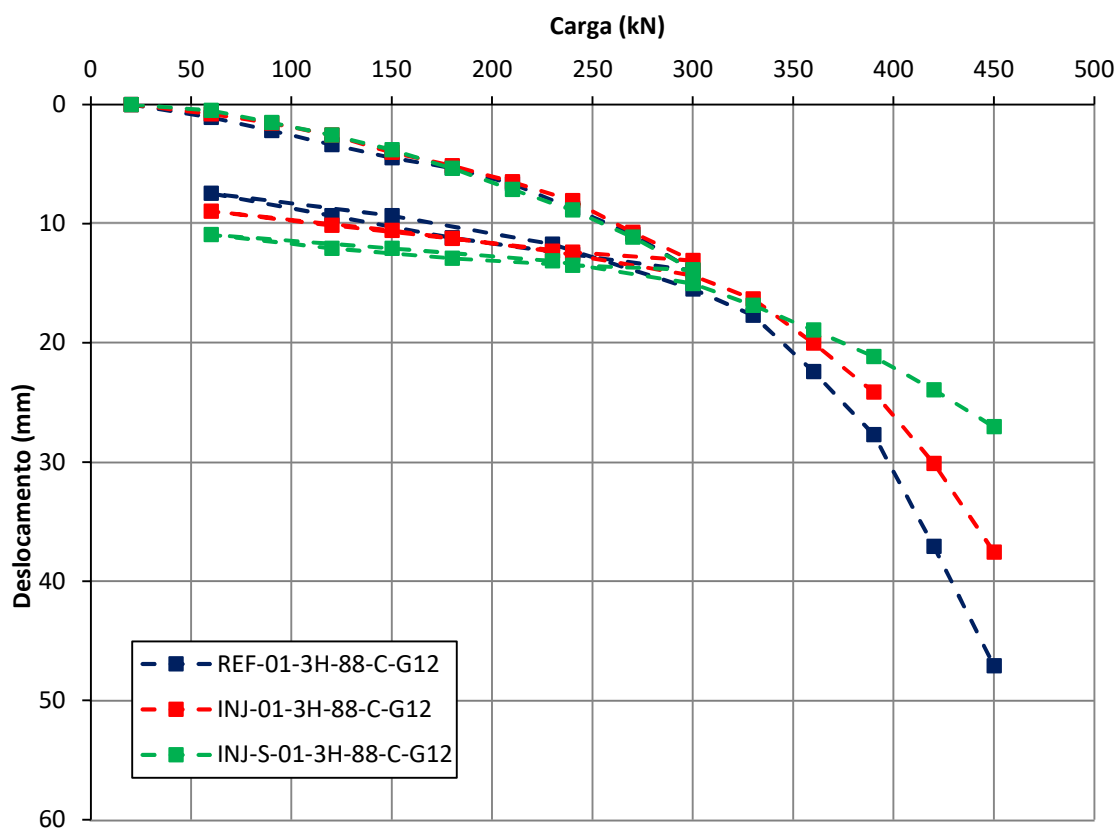


Figura 5.26: Curvas carga *versus* deslocamento das estacas do grupo G12 (carregamento de compressão).

Tabela 5.8: Resumo dos dados de instalação, injeção e prova de carga das estacas do grupo G11 e G12.

Estaca	L (m)	LS (m)	T_M (kN.m)	V_{inj} (sacos de 50 kg)	Q_U (kN)	K_t (m^{-1})
REF-01-3H-88-T-G11	11,5	-	13,70	-	368	26,3
INJ-01-3H-88-T-G11	10,5	-	12,98	3,0	460	34,7
INJ-S-01-3H-88-T-G11	11,0	3,5	13,15	3,0	560	41,6
REF-01-3H-88-C-G12	10,0	-	13,47	-	428	31,1
INJ-01-3H-88-C-G12	9,5	-	12,57	3,0	458	35,6
INJ-S-01-3H-88-C-G12	10,5	3,0	13,25	3,0	565	41,7

A partir dos dados da Tabela 5.8, para as estacas submetidas a carregamento de tração (grupo G11), nota-se que a injeção proporcionou incremento de 25% na capacidade de carga das estacas sem obturador inflável. Quando o obturador foi introduzido o incremento médio foi de 52%. Em termos de K_t , o incremento foi de 32% para as estacas sem obturador e de 58% quando o obturador inflável foi inserido. Comparando-se as estacas injetadas, ou seja, as com e as sem obturador inflável, observa-se que houve um ganho de 22% na capacidade de carga e de 20% no fator K_t . Como observado nas outras 3 áreas anteriores, a injeção de calda de cimento proporcionou melhora considerável nos deslocamentos em carga de serviço (comportamento carga *versus* recalque) e na capacidade de carga deste tipo de fundação submetida à tração.

Analisando os resultados dos ensaios à compressão (grupo G12), que são resumidos na Tabela 5.8, verifica-se que a injeção incrementou a capacidade de carga em 7%. Já, quando o obturador inflável foi inserido na composição, o incremento foi de 32%. Em termos de K_t , os ganhos foram de 15% e 34% para as estacas sem e com obturador inflável, respectivamente.

Comparando-se as melhorias na fundação proporcionadas pela injeção, em termos de capacidade de carga, verifica-se que são observados maiores ganhos nas estacas carregadas em tração do que as estacas carregadas em compressão. Esta ocorrência está relacionada ao fato da calda injetada não melhorar o solo abaixo da ponta da estaca (como verificado, por

meio da exumação realizada na Área 3), e a hélice inferior ser responsável pela maior parcela de carga mobilizada em compressão.

Conforme Lutenegger e Tsuha (2015), a relação entre tração e compressão (T/C) costuma ser menor que a unidade, tendendo a se aproximar de um conforme aumenta-se o número de hélices. Para as estacas ensaiadas nesta pesquisa, na Área 4, esta diferença de comportamento fica clara quando se compraram os resultados das provas de carga a tração e a compressão das estacas não injetadas (REF-01-3H-88-T-G11 e REF-01-3H-88-C-G12), que foram instaladas com torques aproximados, no entanto a estaca em compressão apresentou uma capacidade de carga 16% superior à de tração, ou seja, uma relação T/C de 0,86. A Figura 5.27 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento para uma melhor observação deste comportamento.

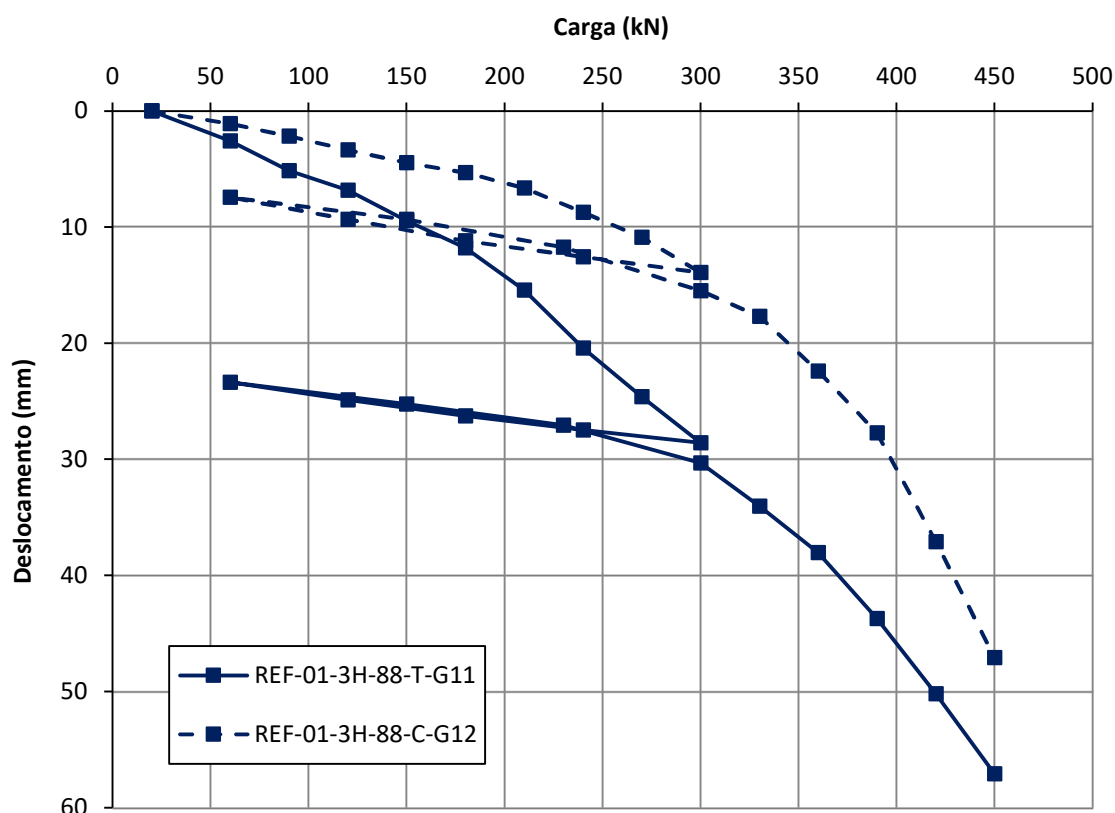


Figura 5.27: Curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas de referência (REF) dos grupos G11 e G12.

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam juntamente as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas injetadas, sem e com obturador inflável, respectivamente. É possível observar que, praticamente, não há diferenças. As curvas obtidas dos ensaios de compressão indicam um comportamento,

apenas, levemente superior, de modo que a relação T/C para as estacas injetadas é praticamente 1,0. Os valores de carga última convencionada e K_t aferidos para estas estacas, apresentados na Tabela 5.8, também conduzem neste sentido.

A diferença no comportamento tração/compressão entre as estacas convencionais e injetadas indica que o processo de injeção proporciona melhoramento e uniformização das propriedades do solo entre as hélices e acima da hélice superior (já que não ocorre fluxo de calda para a região baixo da hélice da ponta), de forma que a mobilização de carga da estaca fica menos dependente da sensibilidade do solo a perturbação causada pela instalação.

Em casos práticos, se a similaridade no comportamento a tração e a compressão das estacas injetadas se confirmar em mais casos, pode ser economicamente vantajoso realizar apenas ensaios a tração (que são mais baratos e simples de realizar que os de compressão, por não demandarem estacas de reação) em vez de ensaios de compressão. Ressalta-se, porém, que obviamente, nos ensaios à tração não há como avaliar a possibilidade de flambagem da estaca, que é possível de ocorrer durante a solicitação de compressão.

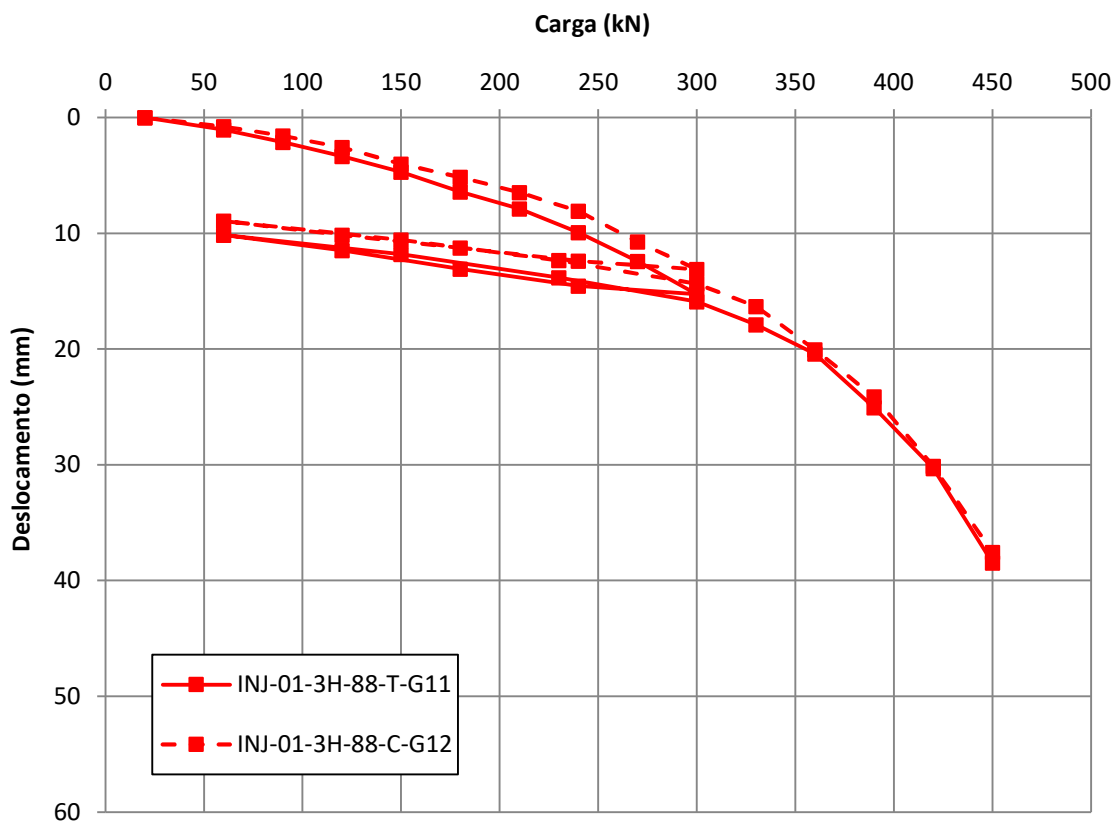


Figura 5.28: Curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas injetadas sem obturador inflável (INJ) dos grupos G11 e G12.

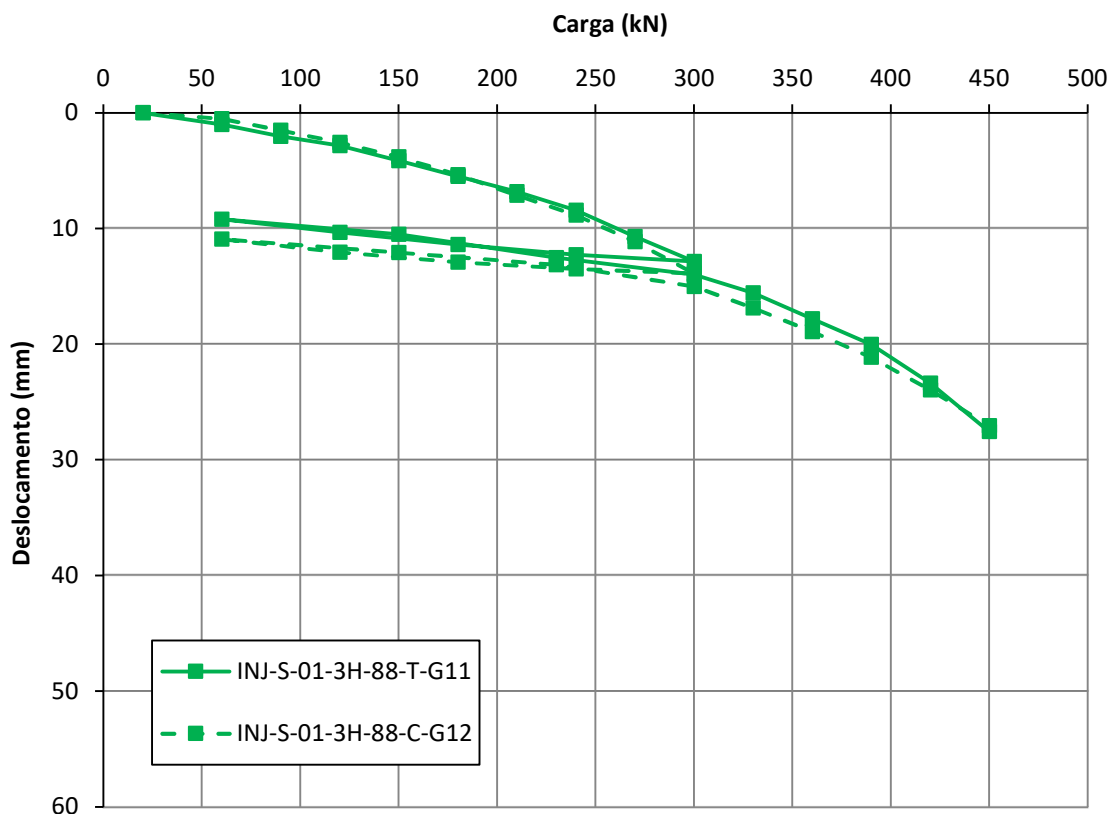


Figura 5.29: Curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga a tração e a compressão realizadas nas estacas injetadas com obturador inflável (INJ-S) dos grupos G11 e G12.

5.5. ANÁLISE DOS GANHOS EM TERMOS DE CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO

A Tabela 5.9 apresenta uma compilação dos dados das instalações, injeções e provas de carga dos 12 grupos de estacas ensaiadas, que totalizam 49 unidades de estacas. Na tabela, são mantidas as mesmas indicações a respeito da ocorrência de extravasamento de calda a superfície do terreno. As estacas do Grupo G12 não são incluídas nesta análise integrada devido terem sido ensaiadas à compressão.

Além das informações trazidas nas tabelas anteriores, onde os resultados de cada campanha de ensaios foram apresentados separadamente, na Tabela 5.9 são inseridas duas colunas que trazem as seguintes informações:

- Fator de melhoria em termos de carga (FMQ_U): relação entre as cargas Q_U obtidas para a estaca injetada em relação a sua estaca de referência ou a média das referências;
- Fator de melhoria em termos de K_t (FMK_t): indica a relação entre os fatores K_t 's obtidos para a estaca injetada em relação a sua estaca de referência ou a média das referências.

Tabela 5.9: Dados de instalação, injeção, e provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de capacidade de carga.

Estaca	L (m)	T _M (kN.m)	V _{inj} (sacos de 50 kg)	Q _U (kN)	K _t (m ⁻¹)	FMQ _U	FMK _t
REF-01-4H-88-T-G1	10,5	9,53	-	146	15,0	-	-
INJ-01-4H-88-T-G1	9,5	9,36	4,5*	238	24,9	1,63	1,66
INJ-02-4H-88-T-G1	9,5	9,09	4,5*	241	25,9	1,65	1,73
REF-01-6H-88-T-G2	8,0	8,91	-	113	12,4	-	-
INJ-01-6H-88-T-G2	9,0	9,09	5,0*	312	33,6	2,76	2,71
INJ-02-6H-88-T-G2	8,5	9,76	5,0*	316	31,7	2,80	2,55
REF-01-4H-101-T-G3	11,0	16,14	-	311	18,9	-	-
INJ-01-4H-101-T-G3	12,5	19,21	4,0*	520	26,5	1,67	1,40
INJ-02-4H-101-T-G3	13,5	17,40	4,0*	692	38,9	2,23	2,06
REF-01-6H-101-T-G4	11,0	17,13	-	302	17,2	-	-
INJ-01-6H-101-T-G4	12,5	19,35	6,0	621	31,4	2,06	1,82
INJ-02-6H-101-T-G4	13,0	16,18	4,0*	547	33,1	1,81	1,92
REF-01-4H-88-T-G5	11,5	13,56	-	297	21,4	-	-
INJ-01-4H-88-T-G5	12,5	14,60	6,0	563	37,7	1,90	1,76
INJ-02-4H-88-T-G5	13,5	14,24	6,0	497	34,1	1,67	1,59
REF-01-6H-88-T-G6	11,0	12,71	-	232	17,9	-	-
INJ-01-6H-88-T-G6	12,0	15,05	4,0*	627	40,7	2,70	2,28
INJ-02-6H-88-T-G6	12,5	14,20	6,0	523	36,0	2,25	2,02
REF-01-4H-88-T-G7	10,5	7,55	-	175	22,7	-	-
REF-02-4H-88-T-G7	10,5	7,55	-	156	20,2	-	-
INJ-01-4H-88-T-G7	11,0	7,69	5,0*	319	40,6	1,93	1,89
INJ-02-4H-88-T-G7	11,0	7,59	3,0*	255	32,8	1,54	1,53
INJ-S-01-4H-88-T-G7	11,0	7,09	6,0	447	61,6	2,70	2,88
INJ-S-02-4H-88-T-G7	11,5	7,50	6,0*	432	56,3	2,61	2,63

Tabela 5.9: Dados de instalação, injeção, e provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de capacidade de carga (continuação).

Estaca	L (m)	T _M (kN.m)	V _{inj} (sacos de 50 kg)	Q _U (kN)	K _t (m ⁻¹)	FMQ _U	FMK _t
REF-01-4H-101-T-G8	8,0	6,20	-	121	19,1	-	-
REF-02-4H-101-T-G8	8,0	7,42	-	123	16,2	-	-
INJ-01-4H-101-T-G8	8,0	4,41	5,0*	215	47,7	1,76	2,70
INJ-02-4H-101-T-G8	8,0	5,52	3,0*	195	34,6	1,60	1,96
INJ-S-01-4H-101-T-G8	8,0	6,14	3,0*	262	41,7	2,15	2,36
INJ-S-02-4H-101-T-G8	8,0	6,13	3,0*	321	51,2	2,63	2,90
REF-01-4H-101-T-G9	16,0	14,20	-	326	22,5	-	-
REF-02-4H-101-T-G9	16,0	15,96	-	325	19,9	-	-
INJ-01-4H-101-T-G9	16,0	17,18	6,0*	770	43,8	2,37	2,07
INJ-02-4H-101-T-G9	16,0	15,40	4,0*	644	40,9	1,98	1,93
INJ-S-01-4H-101-T-G9	16,0	15,43	2,0	417	26,4	1,28	1,25
INJ-S-02-4H-101-T-G9	16,0	14,58	3,0	580	38,9	1,78	1,84
REF-01-6H-101-T-G10	8,0	8,64	-	167	18,9	-	-
REF-02-6H-101-T-G10	8,0	7,36	-	125	16,6	-	-
REF-03-6H-101-T-G10	8,0	9,22	-	195	20,7	-	-
INJ-01-6H-101-T-G10	8,0	6,35	4,0*	332	51,2	2,05	2,73
INJ-02-6H-101-T-G10	8,0	9,11	6,0	303	32,5	1,87	1,74
INJ-S-01-6H-101-T-G10	8,0	7,93	3,5	372	45,9	2,29	2,45
INJ-S-02-6H-101-T-G10	8,0	9,68	2,5	365	36,9	2,25	1,97
REF-01-3H-88-T-G11	11,5	13,70	-	368	26,3	-	-
INJ-01-3H-88-T-G11	10,5	12,98	3,0	460	34,7	1,25	1,32
INJ-S-01-3H-88-T-G11	11,0	13,15	3,0	560	41,6	1,52	1,58
REF-01-3H-88-C-G12	10,0	13,47	-	428	31,1	-	-
INJ-01-3H-88-C-G12	9,5	12,57	3,0	458	35,6	1,07	1,15
INJ-S-01-4H-88-C-G12	10,5	13,25	3,0	565	41,7	1,32	1,34

* Calda extravasou na superfície do terreno;

Em análise dos resultados da Tabela 5.9 da verifica-se que:

1. A injeção proporcionou incrementos variando de 25% a 180% na capacidade de carga e de 32% a 173% no fator K_t das estacas sem obturador inflável. Maiores incrementos foram obtidos para as estacas de seis hélices. Já para as estacas dotadas de obturador inflável, os ganhos de capacidade de carga variaram entre 52% e 170% e em termos de K_t os valores ficaram entre 58% e 190%. Não está sendo considerada a estaca INJ-S-01-4H-101-T-G9, devido ao entupimento da válvula do obturador.
2. Não ocorreu variação significativa dos comprimentos instalados quando se comparam as estacas de quatro e seis hélices instaladas numa mesma área experimental e cujo o critério de paralização foi o mesmo torque de instalação, indicando uniformidade dos perfis geotécnicos das áreas experimentais. Em áreas que apresentem maior variabilidade espacial podem ocorrer variações consideráveis;
3. Com relação ao volume total injetado (V_{inj}) nas estacas ensaiadas, não há uma tendência clara a respeito da quantidade necessária de calda para preenchimento total e extravasamento a superfície do terreno. Foram injetados volumes correspondentes a 2 a 6 sacos de 50 kg, ocorrendo extravasamento de calda a superfície a partir de 3 sacos. Nota-se, entretanto, que a utilização do obturador inflável proporciona incremento do volume injetado;
4. Maior quantidade de cimento injetada induz a uma maior capacidade de carga, para uma dada condição de instalação e geometria de estaca;
5. Os valores de K_t verificados para as estacas convencionais instaladas em solos residuais, ou altamente estruturados ou muito porosos (correspondentes aos grupos G1 a G10) são sensivelmente inferiores aos apresentados pelas estacas instaladas no sedimento arenoso não coesivo presente na Área 4. Isto indica que a presença da estrutura reliquiar em solos residuais ou a proporcionada pela laterização, tem influência durante a instalação no sentido de oferecer resistência a penetração da estaca, aumentando o torque de instalação. Por outro lado, uma vez que a estaca tenha sido instalada, a estrutura do solo é quebrada pela penetração das hélices. Ao final, quando a estaca é carregada em tração, o solo acima das hélices apresentará uma menor resistência, devido a perda da estrutura.

5.5.1. Melhoria *versus* resistência do maciço

Considerando-se que o torque de instalação é uma medida direta da resistência do solo atravessado pela estaca, as Figuras 5.30 e 5.31 apresentam graficamente a relação entre o torque final médio de instalação (T_M) e o fator de melhoria em termos de capacidade de carga (FM_{Q_U}) e em termos de fator torque (FM_{K_t}), respectivamente, para as estacas injetadas e ensaiadas a tração. Não é feita distinção de diâmetro de tubo (haste central), apenas de número de hélices e de presença do obturador inflável na composição.

Os dados indicam uma tendência de que os ganhos proporcionados pelo processo de injeção crescem com o número de hélices da estaca e que a introdução do obturador inflável incrementa os ganhos obtidos. Infere-se que a mesma tendência de crescimento ocorra para estacas de três e seis hélices, embora, estejam disponíveis poucos dados de ensaios para esta análise.

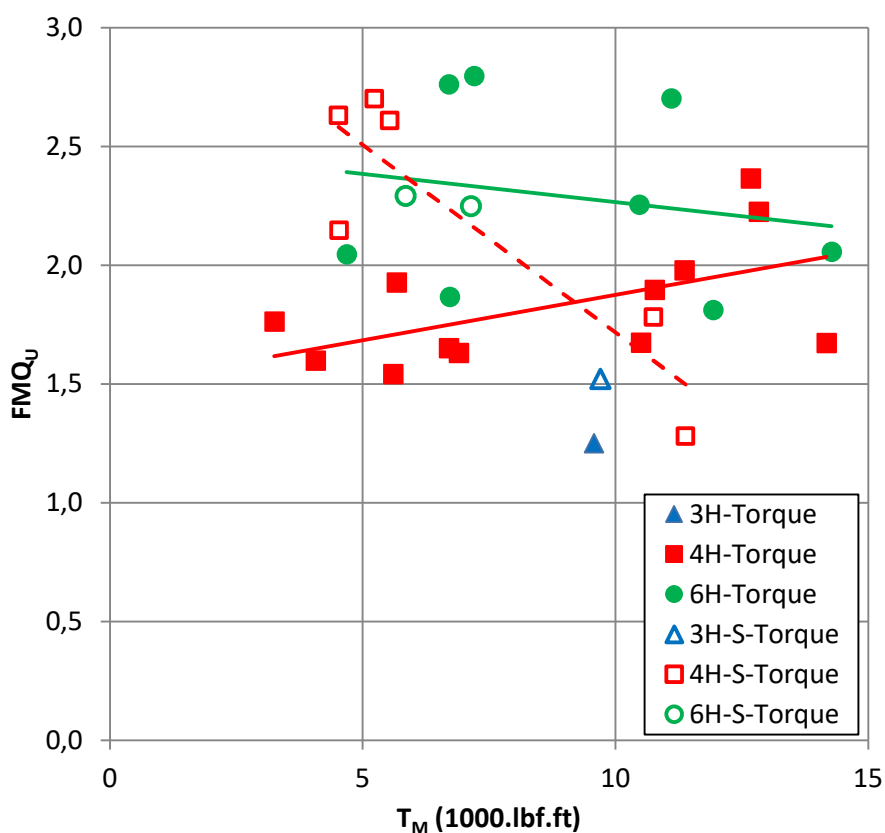


Figura 5.30: Tendência de variação da melhoria na carga última convencional (Q_U) em relação ao torque final médio de instalação (T_M).

Para as estacas de seis hélices sem obturador inflável e para estacas de quatro hélices com obturador inflável, observa-se que há uma tendência clara de redução da melhoria proporcionada pela injeção com o aumento do torque de instalação, o que não ocorre para as estacas de quatro hélices. Para estas, o fator de melhoria FMQ_U parece se manter constante em média de, aproximadamente, 1,83 (e COV de 14%), ao passo que o fator de melhoria FMK_t se mantem da ordem de 1,86, em média (e COV de 18%).

Como o torque de instalação é uma medida direta da resistência do solo atravessado pela estaca, a variação obtida para as estacas de seis hélices e de quatro hélices com obturador inflável indicam que em solos menos resistentes o melhoramento proporcionado pela injeção é mais significativa.

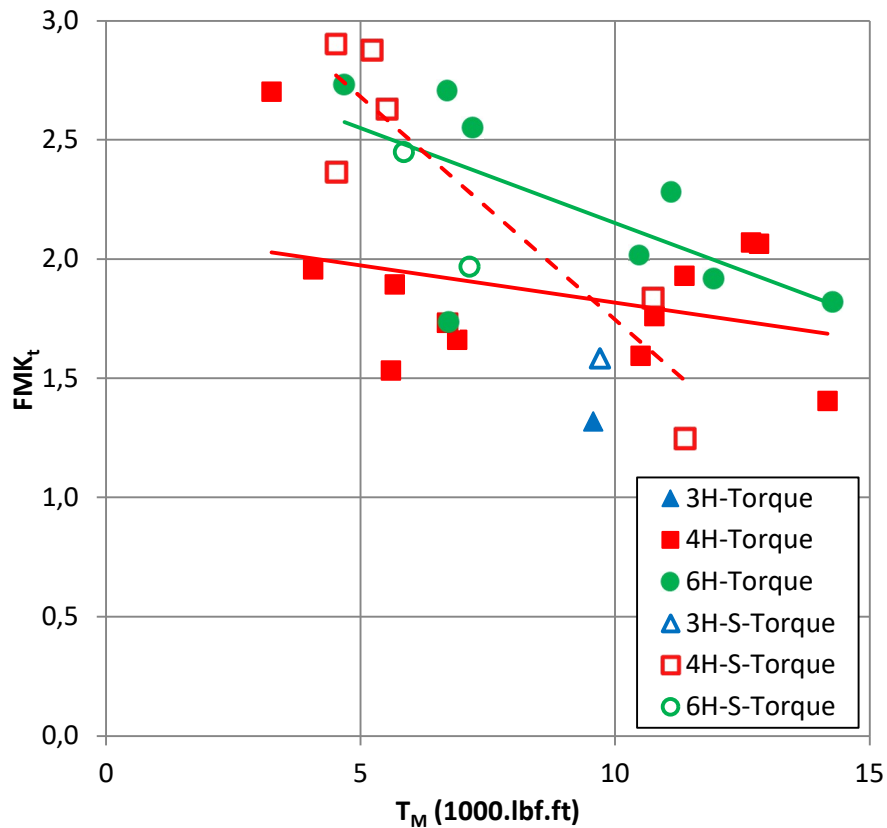


Figura 5.31: Tendência de variação da melhoria no fator torque (K_t) em relação ao torque final médio de instalação (T_M).

5.5.2. Melhoria *versus* volume injetado

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam graficamente a relação entre o volume total injetado (V_{inj}) e o fator de melhoria em termos de capacidade de carga (FMQ_U) e em termos de fator torque

(FMK_t), respectivamente, para todas as estacas injetadas. Mais uma vez, não é feita distinção de diâmetro de tubo, apenas de número de hélices e do uso do obturador inflável. Além dos pontos correspondentes aos ensaios em cada uma das estacas, também é considerado para as classes analisadas no gráfico a não realização da injeção, ou seja, $V_{inj} = 0$ implica em $FMQ_U = FMK_t = 1$, ou seja, sem melhoria.

Com propósito de simplificação da visualização da tendência geral, foram realizados ajustes lineares. No entanto, entende-se que deve existir um limite máximo possível de incremento, pois, como pôde ser visto na exumação realizada na Área Experimental 3, após o preenchimento do volume interno do tubo e dos vazios deixados pela passagem das hélices na instalação (que correspondeu a um saco de cimento de 50 kg, neste caso), o volume adicional se desloca para longe da estaca e, por estar afastado desta, dificilmente influenciará em seu comportamento. O volume final injetado foi de 6 sacos de 50 kg, tendo sido encontrados veios a mais de 2,0 m e a surgência da calda ocorrendo a 3,0 m da estaca. Contudo, ressalta-se que durante a injeção de volume adicional é gerado um acréscimo de pressão, limitado a pressão de ruptura hidráulica do solo em contato com a calda, que expandira as cavidades preenchidas pela calda injetada e melhorará as propriedades do solo. Ressalta-se que a injeção de volume adicional somente foi possível devido a existência do obturador inflável.

Observa-se que as linhas de tendência indicam que ambos os fatores de melhoria definidos (FMQ_U e FMK_t) crescem com o volume injetado. Entretanto, na maioria dos casos ocorreu retorno de calda à superfície do terreno, principalmente nas estacas em que o obturador inflável não esteve presente, impossibilitando a continuidade do processo, conforme descrito no procedimento de injeção no Capítulo 3. Verifica-se que os fatores de melhoria crescem com o número de hélices e, para um mesmo número de hélices, o obturador inflável proporciona ganhos mais significativos para um mesmo volume injetado.

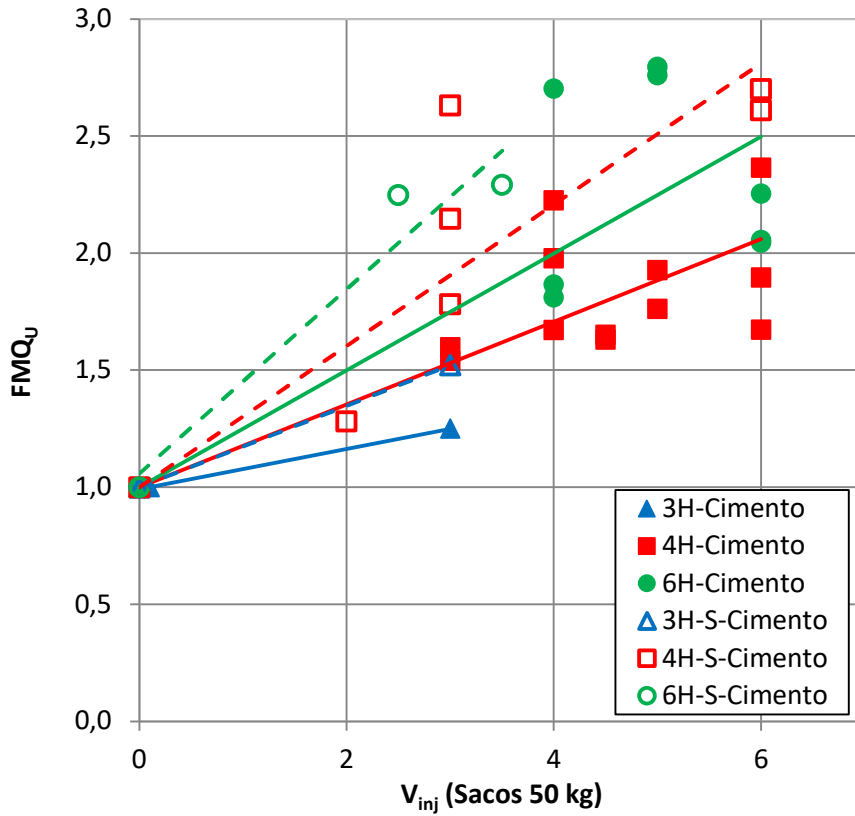


Figura 5.32: Tendência de variação da melhoria na carga última convencionalizada (Q_U) em relação ao volume injetado (V_{inj}).

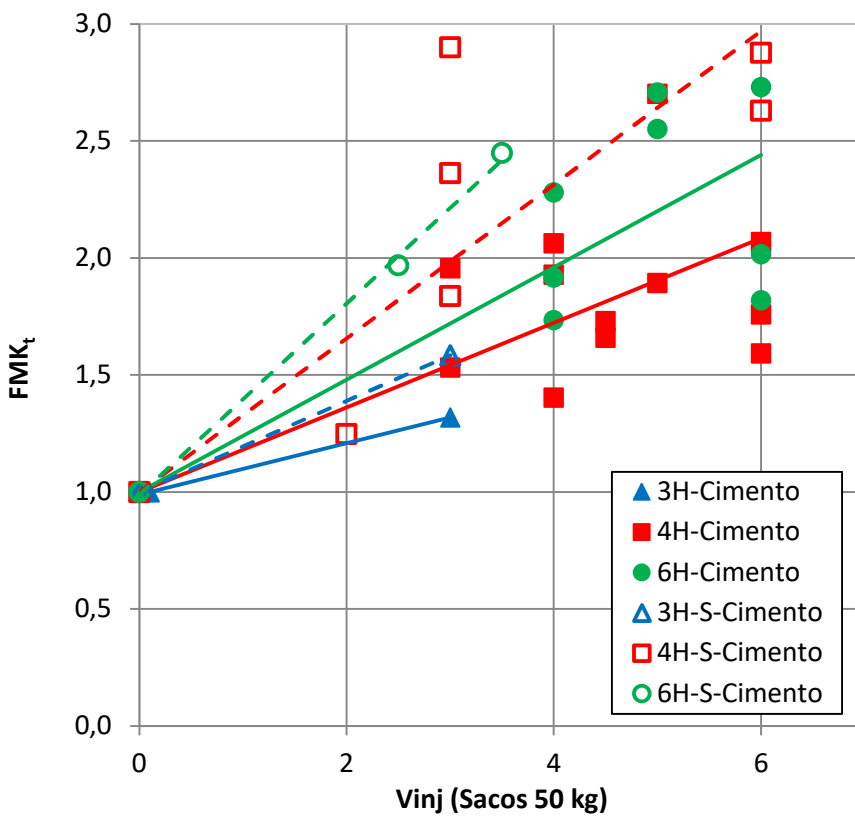


Figura 5.33: Tendência de variação da melhoria no fator torque (K_t) em relação ao volume injetado (V_{inj}).

5.6. ANÁLISE DOS GANHOS EM TERMOS DE REDUÇÃO DE DESLOCAMENTO

Além de resistir ao carregamento aplicado com segurança, é necessário que a fundação também apresente deslocamentos em serviço dentro de certos limites aceitáveis. Por questões de economia, o IEEE 691 (2001) sugere que as fundações sejam projetadas para resistir à carga de projeto, mas que os deslocamentos sejam verificados para as cargas permanentes, apenas. Obviamente, existe uma relação entre o custo e o deslocamento (ou a rigidez) de uma fundação, sendo o custo maior para atender a limites de deslocamento menores.

A carga de projeto da fundação é definida como a reação máxima da estrutura na fundação, considerando os fatores parciais para dimensionamento estrutural do suporte e considerando o período de retorno do vento extremo, que caracteriza o nível de confiabilidade do projeto da LT (tipicamente 150 anos para LT's de 230 kV e 250 anos para LT's de 500 kV, conforme definido pelo ONS; 2017) majorada em 1,10, sendo este último o fator de coordenação de falha. A carga de projeto assim definida é o equivalente à solicitação de cálculo (S_d) definida na NBR 6122 (2019). Logo, o projeto é adequadamente desenvolvido pelo método de valores de cálculo não sendo necessário reduzir a solicitação de cálculo para valores característicos (S_k) para desenvolver o projeto pelo método de valores admissíveis.

Assim, no caso de ancoragens de estais, recomenda-se que sejam 100% ensaiadas, aplica-se o coeficiente ξ_4 e γ_m iguais a 1,0. No caso de estacas de torres autoportantes e mastros, considerando o torque de instalação convalidado para o solo da obra como uma forma semiempírica de determinação da resistência da estaca, se o torque final médio de cada estaca for 11% (ξ_2 igual a 1,11) superior ao torque de projeto convalidado não é necessário ensaiar todas as torres, somente sendo necessários ensaios em número suficiente para atender o item 9.2.2.1 da NBR 6122 (2019).

A ANEEL (2015) e o ONS (2017) estabelecem os requisitos técnicos que devem ser considerados nos projetos de linhas de transmissão, e, no que se refere às estruturas e às suas fundações, estabelecem que os projetos devem ser desenvolvidos segundo a IEC 60826.

De acordo com a norma IEC 60826 (2017), os projetos de fundações de torres de linhas de transmissão devem ser desenvolvidos de forma que, quando em carga, não sejam excedidos os seguintes limites de deslocamento:

- Torres autoportantes e mastros (deslocamento na direção vertical): deslocamento diferencial de uma fundação deve ser de $Y/300$ a $Y/500$ para fora do plano formado pelas outras três fundações, com um máximo de 20 mm. Além disso, os deslocamentos absolutos combinados de todas as fundações não devem provocar uma rotação maior que 1° na estrutura. Y é a distância horizontal entre as fundações (abertura de pernas da torre). Neste caso, a prática é assumir como limite, de forma conservativa, um deslocamento absoluto máximo de 30 mm (ou 20 mm mais o elástico da haste) para a carga de projeto da estaca isolada ou mais carregada do bloco.
- Torres estaiadas (na direção do estai): deslocamento não deve implicar em necessidade de retencionamento de estais. Adota-se um deslocamento de 50 mm para a carga de projeto (conforme KIESSLING et al., 2003).

Com o objetivo de verificar a redução nos deslocamentos para mobilização das cargas de serviço proporcionada pela injeção, foram feitas as seguintes considerações: (i) deslocamento admissível (δ_a) é de 30 mm; (ii) carga admissível (Q_a) é a carga correspondente ao deslocamento admissível para as estacas sem injeção, considera-se o valor médio para os grupos onde foram executadas mais de uma estaca de referência; (iii) deslocamento reduzido (δ) é o deslocamento necessário para mobilização de Q_a por cada estaca injetada. Desta forma, define-se o fator de melhora em termos de deslocamento ($FM\delta$) como a relação entre o deslocamento δ_a e o deslocamento δ (medido). A Tabela 5.10 resume os dados obtidos por meio nesta análise.

Em análise da Tabela 5.10 verifica-se que a injeção proporcionou redução nos deslocamentos para mobilização da carga admissível de 1,54 a 10,0 vezes, o que corresponde a reduções de 35% a 90%. A redução dos deslocamentos proporcionada pela injeção possibilita considerar no projeto uma carga maior em relação a uma estaca de mesma geometria (tubo e hélices) e torque de instalação não injetada.

Tabela 5.10: Resumo dos dados de instalação e injeção, resultados das provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de deslocamento.

Estaca	L (m)	T _M (kN.m)	V _{inj} (sacos de 50 kg)	Q _U (kN)	Q _a (kN)	δ _a (mm)	δ (mm)	FMδ (30/δ)
REF-01-4H-88-T-G1	10,5	9,53	-	146			-	-
INJ-01-4H-88-T-G1	9,5	9,36	4,5*	238	141	30	5,05	5,94
INJ-02-4H-88-T-G1	9,5	9,09	4,5*	241			5,03	5,96
REF-01-6H-88-T-G2	8,0	8,91	-	113			-	-
INJ-01-6H-88-T-G2	9,0	9,09	5,0*	312	111	30	3,57	8,40
INJ-02-6H-88-T-G2	8,5	9,76	5,0*	316			3,58	8,38
REF-01-4H-101-T-G3	11,0	16,14	-	311			-	-
INJ-01-4H-101-T-G3	12,5	19,21	4,0*	520	266	30	10,27	2,92
INJ-02-4H-101-T-G3	13,5	17,40	4,0*	692			10,96	2,74
REF-01-6H-101-T-G4	11,0	17,13	-	302			-	-
INJ-01-6H-101-T-G4	12,5	19,35	6,0	621	264	30	13,55	2,21
INJ-02-6H-101-T-G4	13,0	16,18	4,0*	547			10,36	2,90
REF-01-4H-88-T-G5	11,5	13,56	-	297			-	-
INJ-01-4H-88-T-G5	12,5	14,60	6,0	563	261	30	13,45	2,23
INJ-02-4H-88-T-G5	13,5	14,24	6,0	497			19,48	1,54
REF-01-6H-88-T-G6	11,0	12,71	-	232			-	-
INJ-01-6H-88-T-G6	12,0	15,05	4,0*	627	207	30	7,98	3,76
INJ-02-6H-88-T-G6	12,5	14,20	6,0	523			9,77	3,07
REF-01-4H-88-T-G7	10,5	7,55	-	175			-	-
REF-02-4H-88-T-G7	10,5	7,55	-	156			-	-
INJ-01-4H-88-T-G7	11,0	7,69	5,0*	319	154	30	9,91	3,03
INJ-02-4H-88-T-G7	11,0	7,59	3,0*	255			9,55	3,14
INJ-S-01-4H-88-T-G7	11,0	7,09	6,0	447			4,43	6,77
INJ-S-02-4H-88-T-G7	11,5	7,50	6,0*	432			6,51	4,61

Tabela 5.10: Resumo dos dados de instalação e injeção, resultados das provas de carga das estacas dos Grupos G1 a G12 e análise das melhorias proporcionadas pela injeção, em termos de deslocamento (continuação).

REF-01-4H-101-T-G8	8,0	6,20	-	121			-	-
REF-02-4H-101-T-G8	8,0	7,42	-	123			-	-
INJ-01-4H-101-T-G8	8,0	4,41	5,0*	215	120	30	5,64	5,32
INJ-02-4H-101-T-G8	8,0	5,52	3,0*	195			8,78	3,42
INJ-S-01-4H-101-T-G8	8,0	6,14	3,0*	262			3,29	9,12
INJ-S-02-4H-101-T-G8	8,0	6,13	3,0*	321			3,00	10,0
REF-01-4H-101-T-G9	16,0	14,20	-	326			-	-
REF-02-4H-101-T-G9	16,0	15,96	-	325			-	-
INJ-01-4H-101-T-G9	16,0	17,18	6,0*	770	251	30	7,12	4,21
INJ-02-4H-101-T-G9	16,0	15,40	4,0*	644			8,37	3,58
INJ-S-01-4H-101-T-G9	16,0	15,43	2,0	417			15,92	1,88
INJ-S-02-4H-101-T-G9	16,0	14,58	3,0	580			9,38	3,20
REF-01-6H-101-T-G10	8,0	8,64	-	167			-	-
REF-02-6H-101-T-G10	8,0	7,36	-	125			-	-
REF-03-6H-101-T-G10	8,0	9,22	-	195			-	-
INJ-01-6H-101-T-G10	8,0	6,35	4,0*	332	157	30	3,40	8,82
INJ-02-6H-101-T-G10	8,0	9,11	6,0	303			4,36	6,88
INJ-S-01-6H-101-T-G10	8,0	7,93	3,5	372			4,13	7,26
INJ-S-02-6H-101-T-G10	8,0	9,68	2,5	365			6,64	4,52
REF-01-3H-88-T-G11	11,5	13,70	-	368			-	-
INJ-01-3H-88-T-G11	10,5	12,98	3,0	460	298	30	15,85	1,89
INJ-S-01-3H-88-T-G11	11,0	13,15	3,0	560			12,68	2,37
REF-01-3H-88-C-G12	10,0	13,47	-	428			-	-
INJ-01-3H-88-C-G12	9,5	12,57	3,0	458	397	30	25,53	1,18
INJ-S-01-4H-88-C-G12	10,5	13,25	3,0	565			21,81	1,38

*Calda extravasou na superfície do terreno;

A norma IEC 60826 (2017) não faz qualquer menção a respeito de limites de deslocamento horizontal para fundações de mastros ou torres autoportantes, embora, as cargas horizontais estejam sempre presentes nas hipóteses críticas para cálculo das fundações. Por outro lado, a norma IEC 61773 (1996) afirma que o efeito de cargas aplicadas com inclinação de até 20% com a vertical (ou seja, um ângulo de 11,5°) é pequeno nas fundações de torres, desta forma, permitindo a verticalização da fundação ou de um carregamento inclinado dentro deste limite. Desta forma um eventual deslocamento horizontal decorrente da componente de carga transversal ou longitudinal, qualquer que seja o valor medido num ensaio onde se aplique carregamentos verticais e horizontais será aceitável. Por outro lado, o resultado obtido em ensaio realizado na fase de projeto em estaca vertical ou inclinada é válido para estacas de mesma geometria aplicadas nas mesmas condições e dentro desta variação de ângulo.

5.7. ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO DAS ESTACAS HELICOIDAIS INJETADAS

Neste item são apresentados valores de fatores de capacidade de carga em tração obtidos para as estacas helicoidais reforçadas pela injeção instaladas em solos arenosos, bem como os valores da resistência ao cisalhamento do solo independente da tensão normal para estimativa em solos argilosos. Por meio destes fatores é possível estimar de modo simplificado a capacidade de carga à tração de fundações por estacas helicoidais injetadas, instaladas em condições de subsolo similares às testadas nesta pesquisa.

Visto que os cálculos de capacidade de carga de estacas helicoidais são majoritariamente realizados por meio de métodos teóricos (Equações 2 a 6) foi feita uma avaliação dos fatores de capacidade de carga à tração (N_q) das estacas instaladas em solos arenosos (areia, areia argilosa e silte arenoso) e ensaiadas à tração, que correspondem aos grupos G3 a G6 e G8 a G11.

Para cálculo dos N_q foi considerado que a capacidade de carga (Q_u , conforme proposto por Livneh e El Naggari; 2008) é devida somente à somatória das capacidades individuais de cada hélice das estacas, ou seja, por simplificação foi desconsiderada a contribuição do atrito lateral nas hastes (Equação 6). Para a estimativa de N_q do solo melhorado, foram consideradas a profundidade média das hélices (H) e a área efetiva somada de todas as hélices (A_T), já que

não se dispunha de instrumentação em profundidade para separar as parcelas correspondentes a cada uma das hélices. Além disso, considera-se que a injeção uniformiza as características do solo acima de todas as hélices da estaca.

A Tabela 5.11 resume os valores das áreas efetivas de hélices das composições ensaiadas. Para avaliação da tensão efetiva vertical na profundidade H (σ_v) foram utilizadas correlações de valores de peso específico com os índices de resistência à penetração (N_{SPT}).

Tabela 5.11: Resumo das áreas efetivas das hélices de cada composição ensaiada.

Modelos	Número de hélices	Tubo (mm)	Diâmetro das hélices (mm)	Área efetiva das hélices - A_T (m ²)
3H-88	3	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356	0,204
4H-88	4	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356 – 356	0,297
4H-101	4	$\phi 101,6 \times 7,10$	254 – 305 – 356 – 356	0,290
6H-88	6	$\phi 88,9 \times 7,62$	254 – 305 – 356 – 356 – 356 – 356	0,484
6H-101	6	$\phi 101,6 \times 7,10$	254 – 305 – 356 – 356 – 356 – 356	0,472

A Tabela 5.12 apresenta os valores avaliados de N_q de cada estaca instalada em solo arenoso. Observa-se que a injeção proporcionou aumentos significativos nos valores de N_q . Verifica-se que os valores de N_q das estacas injetadas com obturador inflável são superiores ao das estacas injetadas sem o dispositivo, que por sua vez, são superiores ao das estacas de referência. Com exceção das estacas INJ-S-01-4H-101-T-G9 e INJ-S-02-4H-101-T-G9, nas quais ocorreu o entupimento das válvulas internas do obturador, conforme foi apresentado no item 5.3.

Na Tabela 5.13 é apresentado um resumo dos valores médios de N_q avaliados para cada tipo de solo testado neste estudo, conforme condição da estaca ensaiada (REF, INJ ou INJ-S) e seus respectivos coeficientes de variação (COV), não tendo sido determinado para as estacas instaladas em areia, por conta de somente um caso estar disponível para análise. As estacas INJ-S-01-4H-101-T-G9 e INJ-S-02-4H-101-T-G9 não foram incluídas neste resumo, devido ao entupimento ocorrido. Não há casos de estacas injetadas com obturador inflável em silte arenoso.

Tabela 5.12: Fatores de capacidade de carga à tração avaliados para estacas.

Estaca	L (m)	Q _U (kN)	σ _v (kPa)	Solo	N _{qu} = Q _U /A _T .σ _v
REF-01-4H-101-T-G3	11,0	311	143		7,5
INJ-01-4H-101-T-G3	12,5	520	166	Silte arenoso (N _{SPT} = 18)	10,8
INJ-02-4H-101-T-G3	13,5	692	181		13,2
REF-01-6H-101-T-G4	11,0	302	127		5,0
INJ-01-6H-101-T-G4	12,5	621	150	Silte arenoso (N _{SPT} = 15)	8,8
INJ-02-6H-101-T-G4	13,0	547	157		7,4
REF-01-4H-88-T-G5	11,5	297	151		6,6
INJ-01-4H-88-T-G5	12,5	563	166	Silte arenoso (N _{SPT} = 15)	11,4
INJ-02-4H-88-T-G5	13,5	497	181		9,2
REF-01-6H-88-T-G6	11,0	232	127		3,8
INJ-01-6H-88-T-G6	12,0	627	142	Silte arenoso (N _{SPT} = 13)	9,1
INJ-02-6H-88-T-G6	12,5	523	150		7,2
REF-01-4H-101-T-G8	8,0	121	92		4,6
REF-02-4H-101-T-G8	8,0	123	92		4,6
INJ-01-4H-101-T-G8	8,0	215	92	Areia argilosa (N _{SPT} = 4)	8,1
INJ-02-4H-101-T-G8	8,0	195	92		7,3
INJ-S-01-4H-101-T-G8	8,0	262	92		9,9
INJ-S-02-4H-101-T-G8	8,0	321	92		12,1
REF-01-4H-101-T-G9	16,0	326	201		5,6
REF-02-4H-101-T-G9	16,0	325	201		5,6
INJ-01-4H-101-T-G9	16,0	770	201	Areia argilosa (N _{SPT} = 12)	13,2
INJ-02-4H-101-T-G9	16,0	644	201		11,1
INJ-S-01-4H-101-T-G9	16,0	417	201		7,2
INJ-S-02-4H-101-T-G9	16,0	580	201		10,0

Tabela 5.12: Fatores de capacidade de carga à tração avaliados para estacas (continuação).

REF-01-6H-101-T-G10	8,0	167	77		4,6
REF-02-6H-101-T-G10	8,0	125	77		3,4
REF-03-6H-101-T-G10	8,0	195	77		5,4
INJ-01-6H-101-T-G10	8,0	332	77	Areia argilosa ($N_{SPT} = 4$)	9,2
INJ-02-6H-101-T-G10	8,0	303	77		8,4
INJ-S-01-6H-101-T-G10	8,0	372	77		10,3
INJ-S-02-6H-101-T-G10	8,0	365	77		10,1
REF-01-3H-88-T-G11	11,5	368	169		10,6
INJ-01-3H-88-T-G11	10,5	460	153	Areia ($N_{SPT} = 11$)	14,7
INJ-S-01-3H-88-T-G11	11,0	560	161		17,0

Observa-se que os valores de N_q avaliados para as estacas instaladas na areia (sedimentar inconsolidada) são substancialmente maiores que os avaliados para os solos areia argilosa e silte arenoso (solos residuais e/ou laterizados) para todas as condições de ensaio (REF, INJ e INJ-S). Isso está relacionado ao efeito da instalação, da mesma maneira que ocorre com os K_t 's medidos para os solos estruturados em relação aos avaliados para os solos não-estruturados. Desta forma, entende-se que a injeção repõe alguma parcela da perda de resistência provocada pela instalação das estacas, embora não se tenha como afirmar em que proporção isso ocorre ou mesmo se há algum ganho adicional em relação ao solo intacto.

Tabela 5.13: Resumo dos fatores de capacidade de carga à tração das estacas instaladas em solos arenosos.

Tipo de solo	N_{SPT} médio nas hélices (golpes/0,3 m)	N_q (REF)	Quant. de casos	N_q (INJ)	Quant. de casos	N_q (INJ-S)	Quant. de casos
Areia	11	10,6 (COV ND)	1	14,7 (COV ND)	1	17,0 (COV ND)	1
Areia argilosa	3, 4 e 12	4,8 (COV 16%)	7	9,5 (COV 23%)	6	10,6 (COV 10%)	4
Silte arenoso	13, 15 e 18	5,7 (COV 29%)	4	9,6 (COV 21%)	8	-	-

Considerando o valor padrão do coeficiente de variação da resistência de estacas apresentado pela ICE 60826 (2017), que é de 25%, verifica-se que os coeficientes de variação (COV) de N_q obtidos para a areia argilosa na condição REF e INJ-S foram relativamente baixos, ao passo que o valor determinado para a condição INJ ficou próximo do valor de referência. Para o silte arenoso, o valor do coeficiente de variação definido para as estacas REF foi o mais alto, ficando acima do valor de referência, inclusive. Isto pode estar relacionado a ampla faixa de valores de N_{SPT} das estacas consideradas na amostra e ao agrupamento de dados de campos diferentes, fato não ocorridos nos demais casos avaliados. Já para as estacas em silte arenoso na condição INJ, o valor do COV determinado ficou abaixo do valor de referência. No entanto, para um mesmo terreno, os valores de N_q de solo reforçado apresentam uma pequena variabilidade (COV de 10 a 23%), que é ainda menor para as estacas injetadas com obturador (COV de 10%). Porém, mais terrenos devem ser testados para confirmar que os valores de N_q para o dimensionamento de estacas helicoidais injetadas com obturador em um dado solo arenoso similar.

Para a estimativa da melhora na resistência ao cisalhamento do solo independente da tensão normal (c) para as estacas helicoidais injetadas em solo argiloso, para aplicação em método teórico, foram analisados os resultados dos grupos G1, G2 e G7. Para obter a resistência ao cisalhamento do solo independente da tensão normal melhorada pela injeção, para os casos de estacas instaladas e ensaiadas à tração em solo argiloso, foi considerado a Equação 6 com o fator N_q avaliado para ϕ (ângulo de atrito) igual a zero (que resulta em 0,5). Também são feitas as mesmas considerações a respeito de atrito lateral nas hastes e cálculo de tensão efetiva vertical (σ_v), conforme anteriormente comentado neste mesmo item, para avaliação dos fatores de capacidade de carga em solos arenosos. Na Tabela 5.14 é apresentado um resumo dos valores médios de c (solo sem injeção e melhorado com injeção), conforme condição da estaca ensaiada (REF, INJ ou INJ-S).

Tabela 5.14: Resistências ao cisalhamento do solo independentes da tensão normal retroanalizadas das capacidades de carga à tração das estacas instaladas em solos argilosos.

Estaca	L (m)	Q _U (kN)	σ _v (kPa)	Solo	c [kPa]= (Q _U /A _T - 0,5.σ _v)/9
REF-01-4H-88-T-G1	10,5	146	104	Argila arenosa (N _{SPT} = 6)	49
INJ-01-4H-88-T-G1	9,5	238	93		84
INJ-02-4H-88-T-G1	9,5	241	93		85
REF-01-6H-88-T-G2	8,0	113	63	Argila arenosa (N _{SPT} = 5)	39
INJ-01-6H-88-T-G2	9,0	312	75		112
INJ-02-6H-88-T-G2	8,5	316	69		114
REF-01-4H-88-T-G7	10,5	175	136	Argila silto-arenosa (N _{SPT} = 5)	58
REF-02-4H-88-T-G7	10,5	156	136		51
INJ-01-4H-88-T-G7	11,0	319	143		111
INJ-02-4H-88-T-G7	11,0	255	143		87
INJ-S-01-4H-88-T-G7	11,0	447	143		159
INJ-S-02-4H-88-T-G7	11,5	432	151		153

Na Tabela 5.15 é apresentado um resumo dos valores médios de *c* avaliados para os dois tipos de solo argiloso testados neste trabalho, conforme condição da estaca ensaiada (REF, INJ ou INJ-S) e seus respectivos coeficientes de variação (COV).

Tabela 5.15: Resumo das resistências ao cisalhamento do solo independentes da tensão normal avaliadas à tração para as estacas instaladas em solos argilosos.

Tipo de solo	N _{SPT} médio nas hélices (golpes/0,3 m)	c (REF)	Quant. de casos	c (INJ)	Quant. de casos	c (INJ-S)	Quant. de casos
Argila arenosa	5 e 6	44 (COV 16%)	2	99 (COV 17%)	4	-	-
Argila silto-arenoso	5	54 (COV 9%)	2	99 (COV 17%)	2	156 (COV 3%)	2

Considerando o valor padrão do COV para estacas, que é de 25% (ICE 60826, 2017), verifica-se que os coeficientes de variação de c obtidos para a argila arenosa e argila silto-arenosa em todas as condições de instalação (ou seja, REF, INJ e INJ-S) foram relativamente baixos. Os maiores valores encontrados para o COV se referem às estacas INJ (injetadas sem obturador). Essa maior variabilidade é reflexo da diferença dos volumes injetados para o caso da argila silto-arenosa, que foi de 5 sacos de 50 kg para a estaca INJ-01-4H-88-T-G7 e de 3 sacos de 50 kg na estaca INJ-02-4H-88-T-G7. Já para o caso das estacas instaladas e injetadas em argila arenosa a variabilidade advém da diferença de número de hélices das composições das estacas, o que influencia nos ganhos proporcionados pela injeção, como apresentado no item 5.5.

Portanto, pelos resultados da Tabela 5.15, pode-se concluir que o valor da resistência ao cisalhamento do solo independente da tensão normal do solo argiloso acima das hélices, perturbado pela instalação da estaca, aumentou em média 2,0 vezes quando o solo foi injetado sem obturador, e 3,2 vezes em média quando foi injetado com uso de obturador. Estes valores são sugeridos para projetos de estacas helicoidais injetadas em condições de solo similares. No entanto, não se dispensa a realização da confirmação por meio de prova de carga.

6. CONCLUSÕES

Na presente tese foi realizada uma investigação experimental em campo para avaliar o comportamento de fundações por estacas helicoidais submetidas a um procedimento de melhoria, que consiste da injeção de calda de cimento no solo na região das hélices.

O objetivo deste procedimento foi melhorar as propriedades mecânicas do solo na região das hélices da fundação, prejudicadas pela instalação da estaca no terreno, por meio da injeção de calda de cimento sob pressão. Para tanto foram desenvolvidas as peças para vedação das emendas dos componentes das estacas e um procedimento para execução da injeção.

Numa segunda etapa, com a finalidade de tornar mais eficiente e uniforme este procedimento de injeção, foi desenvolvido e introduzido um dispositivo auxiliar, denominado obturador inflável, que pode ser inserido à composição a qualquer momento durante a execução da fundação, e tem por objetivo impedir o fluxo ascendente da calda de cimento injetada pela interface haste-solo, cujo contato possui espaços vazios criados pela penetração das emendas das hastas durante a instalação da estaca.

Para investigar o desempenho de fundações por estacas helicoidais injetadas com calda de cimento, foram realizadas provas de carga à tração e à compressão, em quatro áreas experimentais geotecnicamente distintas, em estacas de três composições de hélices diferentes, avaliando-se a melhoria causada pela injeção sem e com o obturador inflável inserido na composição. Adicionalmente, foram instaladas estacas destinadas exclusivamente a exumação, para verificação e compreensão do espalhamento da calda injetada no maciço de solo para os dois tipos de procedimentos de injeção testados (com e sem obturador).

a) Resposta geral da fundação ao tratamento com injeção

Os resultados mostraram que a injeção de calda de cimento melhora consideravelmente o comportamento carga *versus* deslocamento das fundações por estacas helicoidais submetidas a tração, obtendo-se ganhos variando de 25% a 180% em termos de capacidade de carga e de 32% a 190% em termos de fator de torque K_t (razão entre capacidade de carga e torque final de instalação). Com relação a redução de deslocamento na condição de serviço da fundação,

chegou-se a reduções de até 90%. A absorção de pequenas quantidades de calda, da ordem de um saco de cimento de 50 kg para estacas curtas (da ordem de 3,0 m de comprimento) já produziria significativo aumento na capacidade de carga ou redução de deslocamento em serviço, quando este for o objetivo do tratamento.

b) Influência do número de hélices

Foi verificado que os ganhos proporcionados pela injeção apresentam tendência de serem maiores com o aumento do número de hélices da estaca. O efeito cumulativo da perturbação no solo causada pela passagem das hélices durante a instalação faz com que as zonas de solo acima das últimas hélices instaladas sofram maior perturbação, conseqüentemente, menor é a sua contribuição na capacidade de carga da fundação. Desta forma, nas estacas convencionais (sem injeção) as hélices superiores contribuem pouco na capacidade de carga à tração deste tipo de fundação. Porém, quando se usa o procedimento de injeção, o solo acima de todas as hélices é melhorado, fazendo com que as hélices superiores colaborem de forma mais significativa na capacidade de carga da estaca. Além disso, uma maior quantidade de hélices faz com que o fluxo ascendente de calda pelos vazios deixados pela instalação seja dificultado, aumentando a pressão de injeção e melhorando o resultado final do processo.

c) Uso de obturador inflável no procedimento de injeção

A introdução do obturador inflável na composição se mostrou viável e efetiva, de forma que sua utilização proporcionou resultados melhores e mais uniformes do que quando este não esteve presente. As mesmas observações feitas a respeito do número de hélices também são válidas quando da utilização deste dispositivo. A posição do obturador inflável na composição da estaca afeta o resultado do tratamento. Os ganhos com o obturador posicionado próximo a superfície foram menores e, devido a pouca contenção lateral há risco de rompimento do dispositivo.

d) Volume de calda injetado

Os resultados indicam que maiores volumes de calda injetados proporcionam maiores ganhos em termos de aumento de capacidade de carga e redução de deslocamento em serviço. Entretanto, verifica-se que o volume tende a ser limitado ao volume necessário para preenchimento dos vazios oriundos da instalação (região de passagem das hélices) nas estacas injetadas sem obturador inflável, o que, por sua vez, limita os ganhos máximos possíveis. Por outro lado, a introdução do obturador pode permitir um aumento significativo no volume injetado e da pressão de injeção. Entretanto aumento da pressão favorecerá a ocorrência de fraturamento hidráulico do solo e o escoamento da calda para zonas afastadas da estaca, onde não terão influência no seu comportamento. Desta forma, haverá um volume ótimo, a partir do qual não será mais percebida melhoria no comportamento da estaca. Estima-se que este volume corresponda a 50 a 75 kg de cimento por hélice, mas esse valor carece de maior investigação.

e) Relação entre capacidade de carga a tração e a compressão

Nesta pesquisa foram realizadas provas de carga à compressão para analisar o comportamento das estacas injetadas nesta condição de carregamento, e para verificação da relação capacidade à tração/capacidade à compressão (T/C) quando da implementação do tratamento. Esta análise foi restrita às estacas de três hélices instaladas em areia. Os resultados indicaram que, diferentemente das estacas helicoidais convencionais, as estacas helicoidais quando injetadas se comportam de maneira similar em tração e em compressão, implicando numa relação T/C de 1,0. O nível de perturbação causada pela instalação neste solo foi inferior aos casos de estacas helicoidais em solos residuais estruturados e porosos. Desta forma, e também pela menor quantidade de hélices, foram obtidos os menores ganhos no comportamento da fundação devido à injeção.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de provas de carga instrumentadas em estacas injetadas para verificação da melhoria em separado, ou seja, das parcelas correspondentes à resistência de cada uma das hélices e por atrito lateral nas hastes de extensão;

- Realizar mais ensaios de tração e de compressão em estacas de maior número de hélices e em solos sensíveis ao efeito da instalação para verificações da tendência da relação T/C para estacas injetadas;
- Realizar ensaios em estacas de mais de seis hélices para confirmação da tendência de crescimento dos fatores de melhoria com o número de hélices;
- Realização de ensaios em estacas injetadas com diferentes traços de calda e em caldas com adições. Alterações reológicas na calda devem afetar diretamente os resultados obtidos com o processo;
- Verificação do comportamento de estacas injetadas sob carregamentos horizontais. O preenchimento dos vazios e as melhorias no solo ao redor das hastes deve contribuir significativamente na resistência à cargas horizontais;
- Desenvolvimento ou adaptação de método de cálculo de capacidade de carga à tração de fundações por estacas helicoidais com injeção com base em maior número de ensaios de campo em diferentes terrenos.
- Analisar o comportamento de estacas helicoidais injetadas submetidas a carregamentos cíclicos;
- Realizar ensaios em estacas helicoidais injetadas com hélices de diferentes formatos;
- Investigar o mecanismo de ruptura de estacas injetadas;
- Investigar qual o volume ótimo de injeção para os diferentes tipos de solo, considerando também as composições de hélices e resistência do 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.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2015). **Sistema de transmissão em corrente contínua de ± 800 kV para reforço à interligação Norte-Sul associado ao escoamento da UHE Belo Monte: Características e requisitos técnicos básicos das instalações de transmissão**. Anexo 6: Lote Único, Leilão Nº 007/2015, Brasília, 127 p.
- ALMEIDA, M.A.; MIGUEL, M.G. e TEIXEIRA, S.H.C. (2011). **Horizontal Bearing Capacity of Piles in a Lateritic Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 137 (1), pp. 59-69.
- ANDRUS, R.D. e CHUNG R.M. (1995). **Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines**. National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce of United States of America, Gaithersburg, 82 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018). **NBR 5629: Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução**. Rio de Janeiro, 38 p.
- _____ (2019). **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 108 p.
- _____ (2008). **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 237 p.
- _____ (2006). **NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 8 p.
- _____ (2018). **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 12 p.

- BEZUIJEN, A. (2010). **Compensation Grouting in Sand: Experiments, Field Experiences and Mechanisms**. Wormann Print Service, Netherlands, 197 p.
- BIAN, Y. (2006). **Development and testing of centrifuge tools for use in grouted helical pier-based foundation rehabilitation studies**. Master Thesis, University of California, Irvine, 102 p.
- BIAN, Y.; HUTCHINSON, T.C.; WILSON, D.; LAEFER, D. e BRANDENBERG, S. (2008). **Experimental Investigation of Grouted Helical Piers for Use in Foundations Rehabilitation**. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, Vol. 134 (9) 1280-1289 pp.
- BROWN, R.W. (2001). **Practical Foundation Engineering Handbook, Second Edition**. McGraw-Hill Professional, New York, 1228 p.
- BYRNE, B.W. e HOULSBY, G.T. (2015). **Helical piles: an innovative foundation design option for offshore wind turbines**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 373 (2035).
- CARVALHO, I.P.G. (2007). **Estudo Teórico-Experimental da Capacidade de Carga à Tração e Compressão de Estacas Metálicas Helicoidais**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 205 p.
- CARVALHO, J.C. et al. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 759 p.
- CAVALCANTI, E. et al., (2006). **Campos Experimentais Brasileiros**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, v. único, pp. 1-90.
- CINTRA, J.C.A. e AOKI, N. (2009). **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. EESC-USP, São Carlos, 108 p.
- 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. (1985). **Uplift behavior of anchor foundations in soil**. Proceedings of session sponsored by Geotechnical Engineering Division of the ASCE in Detroit, Michigan 126 p.
 - 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.
 - CLEMENCE, S.P. e LUTENEGGER, A. (2015). **Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks**. DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute, vol. 9 (1) pp. 21-41.
 - COMPANIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG (2018). **ET-LD-00001 - Especificação técnica para construção de linhas aéreas de distribuição de 69 a 161 kV**. Belo Horizonte, 114 p.
 - DAS, B.M. (1990). **Earth Anchors**. Elsevier Science Publisher, New York, 241 p.
 - DAY, R.W. (2006). **Foundation Engineering Handbook: design and construction with the 2006 international building code**. The McGraw-Hill Co.
 - 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.
 - EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (2018). **Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2027**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 345 p.
- EN 1997-1 (2004). **Eurocode 7 - Geotechnical Design, Part 1: General rules**. Brussels, 171 p.
- FERREIRA, S.R.M. e FERREIRA, M.G.V.X. (2009). **Mudanças de volume devido à variação do teor de umidade em um vértissolo no semiárido de Pernambuco**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, pp. 779-791.
 - 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.
- GUNARATNE, M. (2006). **The Foundation Engineering Handbook.** Taylor and Francis Group, 624 p.
- 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 (2015). **International Building Code - IBC.** International Code Council, Inc, 737 p.
- ICCES (2012). **AC 308: Acceptance Criteria for Helical Foundation Systems and Devices.** International Code Council Evaluation Service, Inc., 23 p.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (1996). IEC 61773: **Overhead lines – Testing of foundations for structures.** Geneva, 100 p.
- _____ (2017). **IEC 60826: Design criteria of overhead transmission lines.** Geneva, 243 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (2001). **IEEE Std 691: Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing.** Piscataway, 193 p.
- IYOMASA, W.S. (2000). **Injeção de solo-cimento em solo residual de granitóide: uma proposta de análise com suporte estatístico e avaliação de eficiência com método geofísico.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 221 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.
- KELLER FOUNDATIONS COMPANY (2017). **Techniques: Ground improvement and grouting.** Disponível em: <http://www.keller.com.au/techniques/ground-improvement-and-grouting/>. Acesso em 19/07/2017.

- KHAZAEI, J. e ESLAMI, A. (2016). **Postgrouted helical piles behavior through physical modeling by FCV**. Marine Georesource and Geotechnology, Taylor and Francis Group, 10 p.
- KIESSLING, F.; NEFZGER, P.; NOLASCO, J.F. e KAJINTZYK, U. (2003). **Overhead Power Lines – Planning, Design, Construction**. Springer, 392 p.
- 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.
- LAEFER, D.F.; MANKE, J.P; TUCKER, J.E.; BATTEN, Y. (2007). **Challenges and Solutions to Model-scale testing for composite Deep Foundations for Existing Foundation Enhancement**. Proceeding of Geo-Denver 2007, ASCE.
- 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, pp. 1142-1155.
- LUTENNEGER, A.J. (2008). **Tension tests on single-helix screw-piles in clay**. Proceedings of 2nd British Geotechnical Association International Conference on Foundations, Dundee, Scotland.
- 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.
- LUTENNEGER, A.J. e TSUHA, C.H.C. (2015). **Evaluating Installation Disturbance from Helical Piles and Anchors Using Compression and Tension Tests**. Proceedings of the XV

Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, pp. 373-381.

- MACHADO, S.L. (1998). **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 360 p.
- MACHADO, S.L. e VILAR, O.M. (2002). **Geotechnical characteristics of an unsaturated soil deposit at São Carlos, Brazil**. Proceedings International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, pp. 1305-1321.
- MAGNUM PIERING, INC. (2010). **Helical Pile Technical Reference Manual**. West Chester, 243 p.
- MANKE, J.P. (2004). **Assessment of Superposition as a Design Framework for the Combined Effects of Soil Improvement and Foundation Remediation**. Master Thesis, North Carolina State University, 212 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.
- MILITITSKY, J. (2019). **Fundações de torres: aerogeradores, linhas de transmissão e de telecomunicações**. Oficina de Textos, São Paulo 239 p.
- 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.
- MORAES, L.S. (2010). **Estacas escavadas com base injetada**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 154 p.
- MURTHY, V.N.S. (2002). **Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Marcel Dekker, New York, 1056 p.
- NABIZADEH, F. e CHOBBASTI, A.J. (2016). **Field Study of Capacity Helical Piles in Sand and Silty Clay**. Transportation Infrastructure Geotechnology, vol. 4 (1) pp. 3-17.
- NABIZADEH, F. e CHOBBASTI, A.J. (2017). **The performance of grouted and un-grouted helical piles in sand**. International Journal of Geotechnical Engineering, DOI: 10.1080/19386362.2017.1368948.
- 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, 228 p.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1995). **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, Vilibor, 240 p.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2019a). **O Sistema em Números: Capacidade instalada do SIN, Expansão da Rede de Transmissão – 2018/2023**. Rio de Janeiro.

Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 26/07/2019.

- _____ (2019b). **Sobre o SIN - Mapas**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em 26/07/2019.
- _____ (2017). **Requisitos mínimos para linhas de transmissão**. Procedimentos de Rede: Submódulo 2.4, Rio de Janeiro, 18 p.
- PACHECO, M.P.; DANZIGER, F.A.B.; e PEREIRA PINTO, C. (2008). **Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: an overview**. Engineering Geology, vol. 101 (3) pp. 226-235.
- 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 RUIPER, S.J. (2000). **Helix pier engineering: handbook 2000**. Ingal Precision Foundations, Inc. Worldwide Helix Pier Distributors.
- REZENDE, L.R. (1999). **Técnicas alternativas para construção de bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 169 p.
- ROMANO A.W. et al. (2009). **Mapa Geológico de Contagem**. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília: CPRM, 2009. Programa Geologia do Brasil. Integração, atualização e difusão dos dados em SIG com nota explicativa.
- SANCHEZ, L.H. (2014). **Avaliação de soluções alternativas para o aumento da capacidade de carga de fundações por estacas helicoidais**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 154 p.

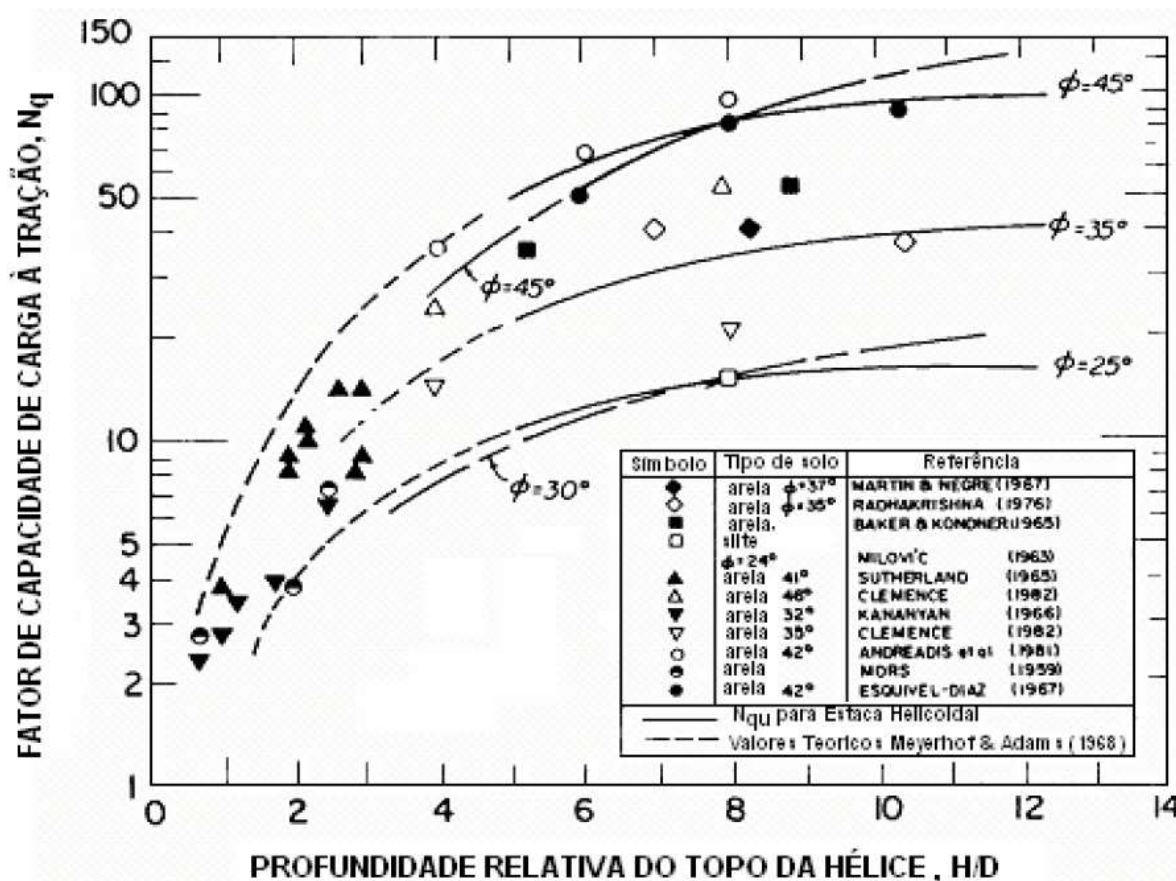
- SANTOS, T.R.S. (2001). **Atrito Lateral e Resistencia de Base em Tubulões a Céu Aberto, em Solos Colapsíveis**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 212 p.
- SANTOS, T.C. (2013). **Estudo da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solos tropicais**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 140 p.
- SANTOS FILHO, J.M.S.M. (2014). **Efeito da instalação de estacas metálicas helicoidais em solo tropical**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 117 p.
- SAKR, M. (2009). **Performance of Helical Piles in Oil Sand**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 46 (9), pp. 1046-1061.
- SAKR, M. (2014). **Interpretation of failure load of helical piles**. Proceedings of GEO Regina, Regina, 8 p.
- 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.
- SOUSA, C.S. et al. (2012). **Mapa Geológico e Recursos Minerais do Estado do Maranhão**. Escala 1:750.000. Belém: CPRM, 2012. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas - SIG.
- SPAGNOLI, G. e GAVIN, K. (2015). **Helical Piles as a Novel Foundation System for Offshore Piled Facilities**. Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Society of Petroleum Engineers.
- SPAGNOLI, G.; GAVIN, K. e BRANGAN, C. (2015). **In situ and laboratory tests in dense sand investigating the helix-to-shaft ratio of helical piles as a novel offshore foundation**

- system.** In Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Taylor & Francis, London, UK, vol. 1, pp. 643-648.
- 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.
 - 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.; SANTOS FILHO, J.M.S.M. e SANTOS, T.C. (2015). **Helical piles in unsaturated structured soil: a case study.** Canadian Geotechnical Journal, vol. 52, pp. 1-15.

- VAUGHAN, P.R. (1985). **Mechanical and Hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particularly 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.
- VEIGA JÚNIOR, J.P. (2000). **Carta Geológica da Folha AS.23-X/Z de São Luís NE/SE.** Escala 1:500.000. Recife: CPRM, 2000. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.
- VICKARS, A.V. e CLEMENCE, S.P. (2000). **Performance of helical piles with grouted shafts.** Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000, New Technological and Design Developments in Deep Foundations, Denver. Pp. 327-341.
- VILLIBOR, D.F. e NOGAMI, J.S. (2009). **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos.** São Paulo: Arte e Ciência, 291 p.
- 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.
- ZHAO, X.; RANDOLPH, M.F.; WANG, D. e GAUDIN, C. (2015). **Upper bound analysis of uplift capacity of a tapered plate anchor in cohesive soil.** Geotechnique Letters, vol. 5 (3), pp. 205-211.

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 9.

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

- 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).