



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MANOEL LEANDRO ARAUJO E FARIAS

**COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA
SUBMETIDA A CARREGAMENTO CÍCLICO EM SOLO ARENOSO**

Natal/RN

2019

MANOEL LEANDRO ARAUJO E FARIAS

**COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA
SUBMETIDA A CARREGAMENTO CÍCLICO EM SOLO ARENOSO**

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

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

Natal/RN

2019

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

Farias, Manoel Leandro Araujo e.

Comportamento à tração de estaca helicoidal instrumentada submetida a carregamento cíclico em solo arenoso / Manoel Leandro Araujo e Farias. - 2019.

85 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa.

1. Engenharia civil - Dissertação. 2. Estaca helicoidal - Dissertação. 3. Instrumentação - Dissertação. 4. Prova de carga à tração - Dissertação. 5. Carregamento quase-estático - Dissertação. 6. Areia - Dissertação. I. Costa, Yuri Daniel Jatobá. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624(043.3)

MANOEL LEANDRO ARAUJO E FARIAS

**COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DE ESTACA HELICOIDAL INSTRUMENTADA
SUBMETIDA A CARREGAMENTO CÍCLICO EM SOLO ARENOSO**

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

Aprovado em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho – Examinador interno (UFRN)

Prof. Dr. Wilson Cartaxo Soares – Examinador externo (UNIPÊ)

Natal/RN

2019

A Deus, por intercessão da Santa Maria Mãe de Deus, Nossa Senhora Aparecida, todos os Santos e Anjos. Amém. À minha família, minha namorada, meus amigos, professores e a todos, sem exceção, que contribuíram com essa vitória, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por intercessão da Santa Maria Mãe de Deus, Nossa Senhora Aparecida, todos os Santos e Anjos, por toda a coragem, fé, bênçãos e graças alcançadas. Amém.

Aos meus pais Francisco Farias da Nóbrega e Maria de Fátima Araújo Cavalcante e Farias, por todos os ensinamentos e apoio nessa caminhada.

À minha irmã Fernanda Araújo e Farias, por todo companheirismo e força ao longo desses anos.

Aos meus tios e tias, em especial Vanuzia Araújo da Silva e Clara Valdete Araújo da Silva, por toda a confiança depositada em mim.

À minha namorada Thayse, seu pai Severino Gonzaga, sua mãe Ana Paula, seu irmão Thiago e sua avó Aurimar, por todo o auxílio e confiança nessa jornada.

A todos os meus amigos e amigas, em especial Italo Andrade e Felipe Augusto, que contribuíram com essa conquista.

Aos professores da graduação e do mestrado, por todos os ensinamentos, conselhos e incentivo para que eu continuasse nesse itinerário fantástico que é a Geotecnia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa, pela paciência, por todos os ensinamentos e pela força depositada em mim.

Aos membros da banca examinadora, por aceitar o convite e disponibilizar tempo para contribuir com este trabalho.

Aos meus amigos João Paulo e Felipy Lima, por toda a ajuda e paciência para solucionar as dúvidas que surgiram.

À empresa GeoQuality Geotecnia LTDA, em nome de Avelino, pelo fornecimento do material para a execução dos ensaios.

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

Ao professor Lúcio, pela contribuição na preparação da estaca para a instrumentação.

A todos os funcionários, pelo afeto, presteza e atendimento quando nos foi necessário.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a todos os demais, sem exceção, que participaram diretamente ou indiretamente e contribuíram com essa vitória.

“DEUS CONOSCO.”

Mateus 1:23

RESUMO

FARIAS, M. L. A. **Comportamento à tração de estaca helicoidal instrumentada submetida a carregamento cíclico em solo arenoso.** 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 85 p.

Estacas helicoidais são fundações instaladas no solo por meio de torque para suportar cargas de compressão, tração e lateral. Apresentam vantagens como alta produtividade e instalação com mínimo barulho e vibração. Neste trabalho é avaliado o comportamento a esforço de tração de estacas helicoidais instrumentadas e submetidas a carregamento cíclico em solo arenoso. A estaca utilizada possuía três hélices e foi instrumentada com extensômetros elétricos de resistência em três seções ao longo do fuste. Foram realizadas três provas de carga à tração, duas com carregamento cíclico quase-estático e uma com carregamento estático, para verificar os efeitos do carregamento cíclico. Os ensaios com carregamentos quase-estáticos foram feitos com valores diferentes de carga cíclica média e amplitude de carga. Os resultados mostraram uma grande influência do modo como os incrementos de carga foram empregados, devido atuarem no processo de densificação e perturbação do solo circunvizinho da estaca. Os deslocamentos acumulados tenderam a se estabilizar após o 10º ciclo, não foram obtidas baixas taxas de acumulação média de deslocamento e o número de ciclos antes da ruptura mostrou-se dependente da carga média e da amplitude cíclica. Com a instrumentação, foi constatada uma redução na rigidez cíclica residual com o aumento na profundidade ao longo do fuste. Através da análise das cargas mobilizadas nas hélices ao longo dos ciclos, se verificou que a contribuição de resistência proveniente da hélice da ponta foi responsável pela maior parte da capacidade de carga. Observou-se que os níveis de carga aplicados e os fatores de interação entre estágios de carga, os quais aparecem quando a carga mínima de uma etapa de carregamento é menor que a carga máxima da etapa anterior, influenciaram o comportamento cíclico do sistema solo-estaca de modo a promover rigidez e reduzir os deslocamentos correspondentes. Por fim, a aplicação dos ciclos de carga quase-estáticos proporcionou aumento na capacidade de carga estática à tração.

Palavras-chave: Estaca helicoidal; Instrumentação; Prova de carga à tração; Carregamento quase-estático; Areia.

ABSTRACT

FARIAS, M. L. A. **Uplift behavior of an instrumented helical pile subjected to cyclic loading in sandy soil.** 2019. MS thesis. Federal University of Rio Grande do Norte. 85 p.

Helical piles are foundations installed in the ground by means of torque to withstand of compression, traction and lateral loads. They offer advantages such as high productivity and installation with minimum noise and vibration. In this work, the pull-out behavior of instrumented helical piles subjected to cyclic loading in sandy soil is evaluated. The used pile had three bearing plates and was instrumented with electric resistance strain gauges in three sections along the shaft. Three pull-out load tests were performed: two with quasi-static cyclic loading and one with static loading, to verify the effects of cyclic loading. The tests with quasi-static loads were made with different values of average cyclic load and load amplitude. The results showed a great influence of the way in which the load increments were used, due to the densification and disturbance of the surrounding soil. The accumulated displacements tended to stabilize after the 10th cycle, low rates of mean displacement accumulation were not obtained and the number of cycles before failure showed to be dependent on the average load and the cyclic amplitude. The instrumented sections allowed to observe the reduction in the residual cyclic rigidity with the increase in depth along the shaft. The analysis of the mobilized loads in the bearing plates along the cycles, showed that the contribution to resistance from the lower bearing plate was responsible for most of the load capacity. It was observed that applied load levels and interaction factors between loading stages, which appear when the minimum load of a loading stage is lower than the maximum load of the previous stage, influenced the cyclical behavior of the soil-pile system by increasing the system rigidity and reducing corresponding displacements. Finally, the application of the quasi-static load cycles increased the static uplift capacity.

Keywords: Helical pile; Instrumentation; Pull-out load test; Quasi-static loading; Sand.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Esquema de estaca helicoidal (PERKO, 2009).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2 – Exemplos práticos da aplicação de estacas helicoidais: (a) Torres de transmissão; (b) Dutos enterrados; (c) Construções em geral; (d) Tirantes (MERIFIELD, 2011).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.3 – Esquema do método de Davisson modificado (PERKO, 2009)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4 – Esquema do método expresso na NBR 6122 (ABNT, 2010).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5 – Coeficientes de dimensionamento A e B (TROFIMENKOV; MARIUPOL'SKII, 1964).....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.6 – Previsão da capacidade de carga à tração: (a) Método do cilindro de cisalhamento; (b) Método das capacidades individuais (A. B. CHANCE CO., 2014)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7 – Relação entre razão crítica e o ângulo de atrito interno do solo (DAS, 1990) ..</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.8 – Superfície de ruptura para estaca helicoidal rasa (DAS, 1990).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.9 – Superfície de ruptura para estaca helicoidal profunda (DAS, 1990)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.10 – Determinação do fator de capacidade de carga à tração (N_{qu}) (MITSCH; CLEMENCE, 1985).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.11 – Relação entre o fator de capacidade de carga e ângulo de atrito interno do solo (A. B. CHANCE CO., 2014)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.12 – Definições de carregamento cíclico (TSUHA et al., 2012b).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.13 – Diagrama de interação cíclica (TSUHA et al., 2012b).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.14 – Diagrama de interação cíclica (SCHIAVON, 2016).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.15 – Formação de lacunas e movimento de partículas de areia durante o carregamento cíclico (SCHIAVON, 2016).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.16 – Rigidez cíclica na zona instável (RIMOY, 2013).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.17 – Transferência de carga ao longo da estaca na prova de carga à tração (CARVALHO, 2007).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.18 – Resistência média do fuste desenvolvida durante o ensaio com carga de tração (GAVIN; DOHERTY; TOLOOIYAN, 2014)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.19 – Comprimento ineficaz (LI; DENG, 2018).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.20 – Capacidade de carga estática pós-cíclica (SCHIAVON, 2016).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.21 – Diagrama de interação de capacidade pós-cíclica (SCHIAVON, 2016).....</i>	<i>31</i>

<i>Figura 3.1 – Campo experimental (Adaptado do Google Earth)</i>	32
<i>Figura 3.2 – Delimitação do terreno experimental</i>	33
<i>Figura 3.3 – Posição da sondagem e as localizações onde foram instaladas as estacas helicoidais</i>	33
<i>Figura 3.4 – Perfil do solo obtido do furo SP02 (COSTA, 2017b)</i>	34
<i>Figura 3.5 – Vista lateral de um corte após conclusão da última prova de carga (QUEIROZ, 2018)</i>	35
<i>Figura 3.6 – Radargrama do local de instalação da estaca helicoidal (Adaptado de COSTA, 2017a)</i>	36
<i>Figura 3.7 – Esquema da estaca helicoidal e localização das seções instrumentadas (QUEIROZ, 2018)</i>	37
<i>Figura 3.8 – Estaca helicoidal utilizada na pesquisa</i>	38
<i>Figura 3.9 – Perfuratriz hidráulica modelo MC150 (COSTA, 2017b)</i>	39
<i>Figura 3.10 – Montagem dos ensaios de prova de carga à tração</i>	40
<i>Figura 3.11 – Equipamentos utilizados nos ensaios de prova de carga à tração</i>	41
<i>Figura 3.12 – Evolução das cargas aplicadas em cada etapa do Ensaio A</i>	42
<i>Figura 3.13 – Evolução das cargas aplicadas em cada etapa do Ensaio B</i>	42
<i>Figura 4.1 – Ensaio com carregamento quase-estático A</i>	45
<i>Figura 4.2 – Ensaio com carregamento quase-estático B</i>	45
<i>Figura 4.3 – Resultado da instrumentação no Ensaio A</i>	47
<i>Figura 4.4 – Resultado da instrumentação no Ensaio B</i>	47
<i>Figura 4.5 – Transferência de cargas no Ensaio A</i>	49
<i>Figura 4.6 – Transferência de cargas no Ensaio B</i>	49
<i>Figura 4.7 – Deslocamentos acumulados do Ensaio A</i>	52
<i>Figura 4.8 – Deslocamentos acumulados do Ensaio A sem a etapa A-04</i>	52
<i>Figura 4.9 – Deslocamentos acumulados do Ensaio B</i>	53
<i>Figura 4.10 – Diagrama de interação cíclica com os resultados dos Ensaios A e B</i>	56
<i>Figura 4.11 – Ilustração dos parâmetros de rigidez e deslocamento utilizados nas análises (RIMOY et al., 2013)</i>	57
<i>Figura 4.12 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio A: Carregamento)</i>	58
<i>Figura 4.13 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio B: Carregamento)</i>	58
<i>Figura 4.14 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de $N=1$ de cada etapa</i>	59

<i>Figura 4.15 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de $N=1$ de cada etapa (Ensaio B: Carregamento)</i>	60
<i>Figura 4.16 – Rigidez cíclica na seção S_1 (Ensaio A: Carregamento)</i>	61
<i>Figura 4.17 – Rigidez cíclica na seção S_2 (Ensaio A: Carregamento)</i>	61
<i>Figura 4.18 – Rigidez cíclica na seção S_3 (Ensaio A: Carregamento)</i>	62
<i>Figura 4.19 – Rigidez cíclica na seção S_1 (Ensaio B: Carregamento)</i>	62
<i>Figura 4.20 – Rigidez cíclica na seção S_3 (Ensaio B: Carregamento)</i>	63
<i>Figura 4.21 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio A: Carregamento)</i>	64
<i>Figura 4.22 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio B: Carregamento)</i>	64
<i>Figura 4.23 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio A: Descarregamento)</i>	65
<i>Figura 4.24 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio B: Descarregamento)</i>	66
<i>Figura 4.25 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de $N=1$ de cada etapa (Ensaio A: Descarregamento)</i>	67
<i>Figura 4.26 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de $N=1$ de cada etapa (Ensaio B: Descarregamento)</i>	67
<i>Figura 4.27 – Rigidez cíclica na seção S_1 (Ensaio A: Descarregamento)</i>	68
<i>Figura 4.28 – Rigidez cíclica na seção S_2 (Ensaio A: Descarregamento)</i>	68
<i>Figura 4.29 – Rigidez cíclica na seção S_3 (Ensaio A: Descarregamento)</i>	69
<i>Figura 4.30 – Rigidez cíclica na seção S_1 (Ensaio B: Descarregamento)</i>	69
<i>Figura 4.31 – Rigidez cíclica na seção S_3 (Ensaio B: Descarregamento)</i>	70
<i>Figura 4.32 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio A: Descarregamento)</i>	71
<i>Figura 4.33 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio B: Descarregamento)</i>	71
<i>Figura 4.34 – Cargas mobilizadas nas hélices H_1 e H_3 (Ensaio A)</i>	72
<i>Figura 4.35 – Cargas mobilizadas na hélice H_3 (Ensaio B)</i>	73
<i>Figura 4.36 – Curva carga-deslocamento do ensaio com carga estática pós-cíclica</i>	74
<i>Figura 4.37 – Comparativo entre os resultados pré-cíclicos de Queiroz (2018) e pós-cíclicos</i>	75

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Critérios de ruptura comumente usados (ZHANG; LI; TANG, 2005).....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2.2 – Valores de K_u para alguns valores de ϕ (MITSCH; CLEMENCE, 1985).....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 2.3 – Fator empírico de torque (HOYT; CLEMENCE, 1989)</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.1 – Índice de vazios e peso específico do solo (COSTA, 2017b).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 3.2 – Dados pretendidos no Ensaio A</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 3.3 – Dados pretendidos no Ensaio B</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 3.4 – Resumo dos ensaios realizados</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4.1 – Profundidade das hélices após a instalação</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4.2 – Profundidade das seções instrumentadas após a instalação</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4.3 – Fator de interação em cada etapa dos ensaios.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4.4 – Fator de interação em cada seção do Ensaio A.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4.5 – Fator de interação em cada seção do Ensaio B.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4.6 – Razão entre as cargas nas seções instrumentadas e no topo da estaca.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4.7 – Parcelas de contribuição de resistências médias no Ensaio A</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4.8 – Parcelas de contribuição de resistências médias no Ensaio B.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4.9 – $V_{médio}$, $N_{ruptura}$ e classificação da estabilidade</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 4.10 – Comparativo entre as parcelas de contribuição de resistências de Queiroz (2018) e do Ensaio C.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 4.11 – Previsão da capacidade de carga à tração.....</i>	<i>76</i>

SUMÁRIO

1° CAPÍTULO: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Escopo e organização.....	3
2° CAPÍTULO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. Estacas helicoidais.....	4
2.2. Capacidade de carga à tração.....	6
2.2.1. Métodos de carregamento.....	6
2.2.2. Interpretação dos resultados.....	7
2.3. Métodos para previsão da capacidade de carga à tração.....	10
2.3.1. Estacas helicoidais simples.....	10
2.3.2. Estacas helicoidais com múltiplas hélices.....	11
2.3.2.1. Método do cilindro de cisalhamento.....	12
2.3.2.2. Método das capacidades individuais.....	17
2.3.3. Método empírico.....	19
2.4. Fator de segurança.....	20
2.5. Comportamento à carga cíclica.....	20
2.5.1. Estabilidade à carga cíclica.....	22
2.5.2. Efeitos de cargas cíclicas no comportamento das estacas helicoidais.....	24
2.5.3. Rigidez cíclica.....	25
2.5.4. Instrumentação em estacas helicoidais submetidas à carga de tração.....	26
2.6. Comportamento estático pós-cíclico.....	29
3° CAPÍTULO: MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1. Área experimental.....	32
3.2. Características geológicas e geotécnicas do local.....	34
3.3. Informações sobre a preparação, instrumentação e calibração da estaca helicoidal.....	37
3.4. Instalação da estaca helicoidal.....	39
3.5. Montagem dos ensaios de prova de carga à tração.....	40
3.6. Execução dos ensaios de prova de carga à tração.....	41

3.7. Resumo dos ensaios realizados.....	43
4° CAPÍTULO: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. Profundidade de instalação	44
4.2. Ensaio com carga cíclica quase-estática	45
4.2.1. Resultados das seções instrumentadas.....	46
4.2.2. Transferência de carga.....	48
4.2.3. Deslocamento acumulado.....	51
4.2.4. Taxa de acumulação de deslocamento e diagrama de interação cíclica	54
4.2.5. Rigidez cíclica	56
4.2.5.1. Rigidez cíclica no carregamento	57
4.2.5.2. Rigidez cíclica no descarregamento	65
4.2.6. Cargas mobilizadas nas hélices ao longo dos ciclos.....	72
4.3. Ensaio com carga estática pós-cíclica.....	74
4.3.1. Previsão da capacidade de carga à tração	76
5° CAPÍTULO: CONCLUSÕES.....	78
5.1. Sugestões para futuras pesquisas	79
REFERÊNCIAS	80
ANEXOS	84

1º CAPÍTULO: INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Estaca helicoidal é definida como uma ou um conjunto de hélices organizadas ao longo de um eixo central, denominado de fuste, que é girado no solo para suportar carregamentos. São construídas de duas seções: seção principal e seção de extensão. A seção principal é composta por um eixo de ancoragem com uma ou mais hélices soldadas a ele. As seções de extensão são comprimentos de eixo de ancoragem usadas para aumentar o comprimento total da estaca helicoidal. As seções são conectadas usando uma extremidade sobreposta e um pino de aço, sendo instaladas dentro do solo pela aplicação do torque de rotação até encontrar a camada com resistência requerida.

Podem ser projetadas para resistir cargas à compressão, à tração e lateral e, ademais, são empregadas para suportar diversas estruturas construídas sobre uma ampla variedade de condições de solo, mesmo em situações de dificuldade (PERKO, 2000). Podem ser instaladas inclinadas e em relação aos outros tipos de estacas apresentam vantagens como rapidez de instalação, mínimo barulho e vibração, simples controle de qualidade e eficiência ambiental. São relativamente leves e de fácil transporte, o que promove um bom custo-benefício e as tornam competitivas no mercado (STEPHENSON, 2003).

Mesmo perante as várias vantagens, em algumas situações as estacas helicoidais apresentam deficiências. Isso incluiria a instalação em solos contendo pedras ou afloramentos rochosos, grandes quantidades de cascalho, pedregulhos e em solos de difícil penetração de modo que estaca seja danificada durante a instalação (CARVALHO, 2007) e, além disso, em solos moles ou de baixa capacidade de suporte ($N_{SPT} < 5$) devido a possibilidade de flambagem da estaca quando carregada (SANHUEZA, 2012). Por fim, os estudos sobre cargas laterais e momentos fletores ainda são limitados, o que impede a disseminação de sua aplicação em todos os casos.

Os primeiros usos registrados de uma estaca helicoidal foram há mais de 150 anos, onde serviam para ancorar embarcações e melhorar a maneira como as estruturas eram executadas em solos com baixa capacidade de suporte. As estacas eram feitas de madeira ou de ferro, com seção cilíndrica ou, em alguns casos, octogonal. No Brasil, o uso de estacas helicoidais teve

início em 1998, principalmente para resistir esforços de tração em obras de torres de linha de transmissão de energia elétrica e de telecomunicação (TSUHA, 2007). Desde então, o uso desse tipo de fundação vem crescendo na Engenharia Geotécnica mais tradicional.

Apesar de seu crescente uso, as pesquisas e as literaturas técnicas sobre estacas helicoidais ainda são muito limitadas no Brasil, principalmente no que se refere a dados provindos de ensaio de campo e instrumentação. Além do mais, a compreensão do comportamento desse tipo de fundação, com ênfase no desempenho cíclico em areia pura, ainda apresenta várias lacunas. Diante disso, o presente trabalho se justifica na possibilidade de investigar o comportamento das estacas helicoidais no emprego em condições de carregamento cíclico quando fundadas em solo arenoso e, ademais, na perspectiva de prover dados para que, com conhecimento mais profundo, possa ser cada vez mais empregado.

1.2. Objetivos

A presente pesquisa tem como principal objetivo analisar o comportamento de estacas helicoidais instrumentadas em seções ao longo do fuste, submetidas a ensaios com cargas cíclicas e pós-cíclicas, e instaladas em um depósito de areia pura.

Os objetivos específicos são:

- Verificar, através da instrumentação, a distribuição dos esforços desenvolvidos ao longo da estaca helicoidal durante os ensaios realizados com cargas de tração;
- Analisar a evolução do deslocamento acumulado ao longo dos ciclos de carga, para diferentes incrementos de carga;
- Analisar a evolução da rigidez cíclica ao longo dos ciclos de carga, para diferentes incrementos de carga e em diversas profundidades da estaca;
- Avaliar a ocorrência de degradação da estabilidade da estaca helicoidal causada pela aplicação dos ciclos de carga, por variações da carga cíclica média e da amplitude de carga;
- Investigar mudanças na capacidade de carga estática após a aplicação de ciclos de carga quase-estáticos.

1.3. Escopo e organização

A presente pesquisa foi dividida em cinco capítulos, onde serão abordadas informações pertinentes sobre as estacas helicoidais tais como suas diversas aplicações, principais vantagens e, principalmente, seu comportamento quando submetidas a carregamento cíclico e pós-cíclico.

No Capítulo 01, que é a introdução do trabalho, foi mostrada uma contextualização sobre o que são estacas helicoidais, algumas características, um breve contexto histórico de sua aplicação e principal justificativa do trabalho.

No Capítulo 02, no qual é exposta a fundamentação teórica, será apresentado todo o embasamento e os fundamentos para a elaboração da pesquisa, incluindo informações sobre capacidade de carga à tração, fatores que interferem na capacidade de carga, métodos de previsão da capacidade de carga, instrumentação de estacas helicoidais, comportamento a carregamento cíclico e pós-cíclico, entre outras informações.

Na metodologia, que é o Capítulo 03, serão abordados os procedimentos de instrumentação, calibração e instalação da estaca, bem como o local utilizado para a execução dos ensaios e as principais características sobre o solo presente.

Os resultados e discussões serão vistos no Capítulo 04, onde serão apresentados todos os dados obtidos nos ensaios com carga de tração cíclica quase-estática, a distribuição de esforços desenvolvidos ao longo da estaca e o conteúdo sobre o ensaio estático pós-cíclico.

Por fim, no Capítulo 05, destinado as conclusões, será mostrado um resumo sobre as principais informações obtidas nesse trabalho, bem como sugestões para que pesquisas futuras possam ser elaboradas sobre a temática. Após esse capítulo são mostradas as referências utilizadas para a elaboração do trabalho e os anexos relativos aos dados da pesquisa.

2º CAPÍTULO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica sobre estacas helicoidais, incluindo tópicos sobre situações de aplicação, principais características, informações sobre capacidade de carga à tração, mecanismos que afetam a capacidade de carga, métodos de previsão da capacidade de carga, instrumentação de estacas helicoidais e comportamento a carregamento cíclico e pós-cíclico.

2.1. Estacas helicoidais

Perko (2009) define estaca helicoidal como sendo uma ou um conjunto de hélices dispostas ao longo de um eixo central (fuste) que é instalado no solo por meio de torque para suportar estruturas. A quantidade e o diâmetro das hélices são definidos de acordo parâmetros do solo e interferem diretamente na capacidade carga desejada (TSUHA, 2007). A Figura 2.1 esquematiza uma estaca helicoidal.

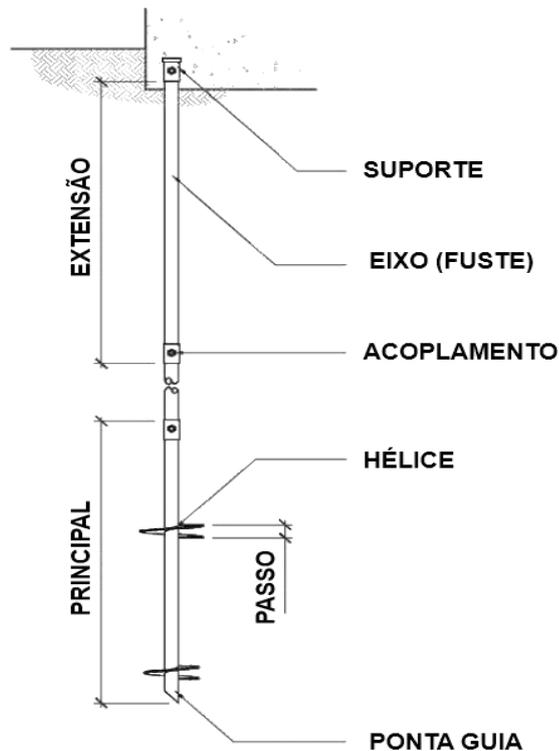


Figura 2.1 – Esquema de estaca helicoidal (PERKO, 2009)

Podem possuir apenas uma hélice, denominadas estacas helicoidais simples, ou múltiplas hélices. As hélices podem possuir o mesmo diâmetro ou diâmetros variados e a sua quantidade é determinada de acordo com os parâmetros do solo e a capacidade de carga necessária.

As estacas helicoidais oferecem vantagens tanto para aplicação em novas construções como para a modernização e recuperação de construções já executadas. A sua principal vantagem é a confiabilidade. Quando instaladas corretamente, as estacas helicoidais atendem e até excedem suas capacidades de projeto (STEPHENSON, 2003). Além disso, com o mínimo de barulho e vibração, podem ser instaladas e carregadas rapidamente e, ao contrário de outros tipos de fundações profundas, podem ser executadas em áreas com acesso limitado (PERKO, 2000).

Possuem resistência à compressão, à tração e a cargas laterais, e podem ser instaladas em qualquer ângulo para melhorar a sua capacidade contra cargas inclinadas. Originalmente foram projetadas para resistir cargas de tração devido a força aplicada pelo vento nas torres de transmissão. Entretanto, atualmente existem diversas situações em que as estacas helicoidais são empregadas, tais como dutos enterrados e tirantes (Figura 2.2) (MERIFIELD, 2011). Vale salientar que ainda são utilizadas como reforço de fundações e grampeamento de solo (STEPHENSON, 2003).

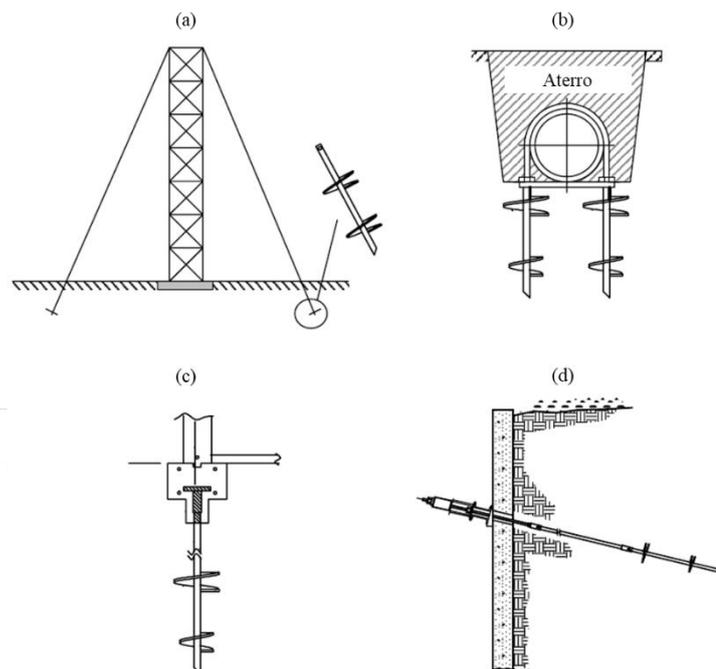


Figura 2.2 – Exemplos práticos da aplicação de estacas helicoidais: (a) Torres de transmissão; (b) Dutos enterrados; (c) Construções em geral; (d) Tirantes (MERIFIELD, 2011)

2.2. Capacidade de carga à tração

De acordo com Perko (2009) os ensaios de capacidade de carga à tração axial em estacas helicoidais podem ser divididos em duas categorias: ensaios de prova de carga e ensaios de desempenho. Os ensaios de prova de carga são geralmente utilizados para fins de controle de qualidade na construção de sistemas de contensão de solo. O número de ensaios normalmente depende do fator de segurança utilizado no projeto, da experiência do projetista, da variabilidade das condições do solo, da importância da estrutura e da natureza temporária ou permanente do sistema. Já os ensaios de desempenho são mais rigorosos e geralmente são usados para verificar o desempenho da estaca em relação às suposições de projetos.

2.2.1. Métodos de carregamento

Na norma D3689M-07 (ASTM, 2013) são tipificados seis ensaios de capacidade de carga à tração axial em estacas, sendo:

- **Carga rápida:** A carga é aplicada em incrementos de 5% da carga de ruptura prevista até que a carga última seja alcançada. Durante cada intervalo a carga é mantida constante por um determinado intervalo de tempo que varia entre 4 e 15 minutos. Por fim, o carregamento é removido em 5 a 10 decrementos aproximadamente iguais, também se mantendo constante pelo mesmo intervalo de tempo.
- **Carga constante:** O carregamento é aplicado em incrementos de 25% até o valor de 200% da carga de projeto. Depois de aplicada a carga máxima, é mantido o esforço por um período de pelo menos 12 horas. Por fim, quando o deslocamento axial medido no período de 1 hora não exceder 0,25 mm, é realizado o descarregamento em decréscimos de 25% da carga máxima com 1 hora entre eles.
- **Carga constante em excesso:** Inicialmente é feito o mesmo procedimento de carga e descarga do ensaio com carga constante. Posteriormente, a estaca é recarregada em incrementos de 50% da carga de projeto até a carga máxima do ensaio, com intervalo entre eles de 20 minutos. Finalmente, agora com incrementos de 10% da carga de projeto e com o mesmo intervalo de tempo entre eles, a estaca é carregada até a ruptura. Se a ruptura não ocorrer, a carga máxima é mantida por 2 horas e depois removida em quatro decrementos iguais, permitindo 20 minutos entre eles. Esse procedimento é aplicado para avaliar a capacidade máxima da estaca, em vez de apenas 200% da carga de projeto.

- Carga em intervalos de tempo constante: O procedimento é o mesmo do ensaio com carga constante, entretanto a carga é aplicada em incrementos de 20% da carga de projeto e o descarregamento é realizado em decréscimos de 25% da carga máxima do ensaio, ambos com período de 1 hora entre eles.
- Taxa de deslocamento constante: Nesse ensaio a taxa de deslocamento da estaca, como o nome já explicita, é mantida constante. Essa taxa vai depender do tipo de solo. A estaca é carregada até que a retirada total seja de pelo menos 15% do diâmetro médio ou até a parada do deslocamento. A taxa de retirada é monitorada e controlada de modo que se mantenha constante.
- Carga cíclica: Inicialmente é realizado o mesmo procedimento do ensaio com carga constante. Após isso, são aplicadas cargas iguais a 50%, 100% e 150% da carga de projeto e mantida a carga total em cada caso por 1 hora. Posteriormente, os carregamentos são removidos em decréscimos iguais aos incrementos, permitindo 20 minutos entre eles. Após remover a carga, a mesma é reaplicada a cada nível de carga anterior em incrementos iguais a 50% da carga de projeto, permitindo 20 minutos entre eles. Finalmente, as cargas são adicionadas de acordo com o ensaio com carga constante e, após a carga máxima requerida ter sido vencida, removida também de acordo com ensaio com carga constante.

Perko (2009) cita que, devido as estacas helicoidais geralmente reagirem rapidamente às cargas aplicadas, o procedimento mais utilizado é o de carga rápida. No Brasil a norma que padroniza a metodologia de execução dos ensaios de prova de carga à compressão e à tração é a NBR 12131 (ABNT, 2006).

2.2.2. Interpretação dos resultados

A maioria das estruturas possuem sensibilidade e exigem limitações ao deslocamento total. Desse modo, a capacidade de carga das estacas é frequentemente limitada com base no seu deslocamento. Nesse sentido, a capacidade de carga é definida como a máxima carga que pode ser aplicada a uma estaca, em que os deslocamentos continuem sem a necessidade de cargas adicionais.

Existem diversos métodos de análise da capacidade de carga à tração em estacas. O método de Davisson (1972) é um dos mais recomendados. Por esse método, o deslocamento é dado pela Equação 2.1.

$$\delta = \frac{P \cdot z}{A_g \cdot E} + \frac{D}{120} + 4$$

Equação 2.1

Onde:

- δ : Deslocamento da estaca;
- P: Carga aplicada;
- z: Comprimento do fuste;
- A_g : Área bruta da seção transversal da estaca;
- E: Módulo de elasticidade do material da estaca;
- D: Diâmetro da estaca.

Existe também uma versão modificada do método Davisson. O método consiste em transladar uma linha tracejada com inclinação igual à deformação elástica da estaca em 10% do seu diâmetro médio da hélice helicoidal (PERKO, 2009). Segundo Perko (2009) esse método é o comumente utilizado para ensaios de capacidade de carga em estacas helicoidais. A Figura 2.3 mostra o segmento linear proposto pelo método interceptando a curva de carregamento versus deslocamento de um ensaio de prova de carga à tração.

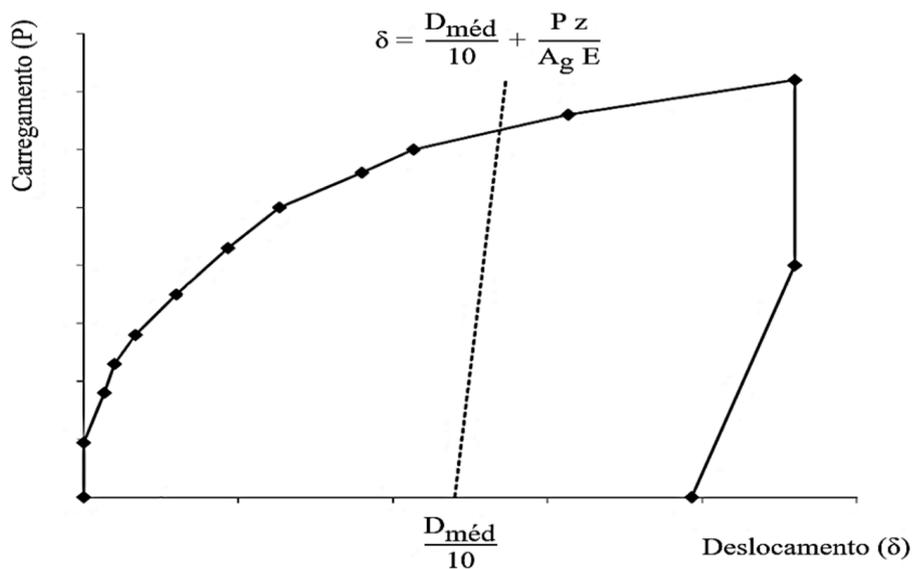


Figura 2.3 – Esquema do método de Davisson modificado (PERKO, 2009)

O método da NBR 6122 (ABNT, 2010) é semelhante ao método de Davisson modificado. A diferença está em transladar a linha tracejada com inclinação igual à deformação elástica da estaca em 30% do diâmetro médio da hélice helicoidal (Figura 2.4).

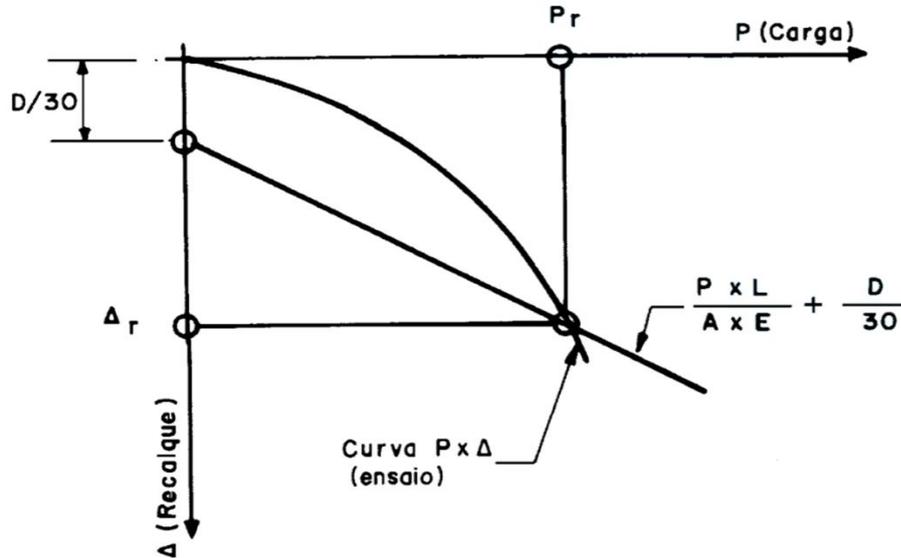


Figura 2.4 – Esquema do método expresso na NBR 6122 (ABNT, 2010)

Em um estudo com estacas helicoidais que abrangeu 19 ensaios de capacidade de carga em escala real em diferentes solos e modelagem numérica usando análise de elementos finitos, Livneh e El Naggari (2008) propuseram um método para determinar a capacidade máxima de estacas seguindo o mesmo raciocínio dos demais métodos citados, porém agora transferindo a linha com inclinação igual à deformação elástica em 8% do maior diâmetro da hélice.

Zhang, Li e Tang (2005) resumiram os critérios de ruptura comumente usados para interpretar a capacidade de carga em estacas. Tais são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Critérios de ruptura comumente usados (ZHANG; LI; TANG, 2005)

Critério de ruptura	Deslocamento
Critério de FDOT (FDOT, 1999)	$\delta = \frac{P z}{A_g E} + \frac{D}{30}$, para $D > 61$ cm
Critério FHWA (REESE; O'NEILL, 1988)	$\delta = 5\% D$
Critério ISSMFE (ISSMFE, 1985) e critério BS 8004 (BSI, 1986)	$\delta = 10\% D$
AC358 (ICC-ES, 2007)	Máxima carga

2.3. Métodos para previsão da capacidade de carga à tração

Existem algumas metodologias para a previsão da capacidade de carga à tração de estacas helicoidais fundadas em areia. Podem ser divididos entre os métodos empíricos, que são elaborados por meio de experiência e observações, e os métodos que utilizam como base as premissas da mecânica dos solos.

2.3.1. Estacas helicoidais simples

Trofimenkov e Mariupol'skii (1964) elaboraram uma metodologia para prever a capacidade de carga à tração de estacas helicoidais com apenas uma hélice. Com os resultados, eles propuseram a Equação 2.2 para determinar a tensão máxima transmitida ao solo pela hélice sob o efeito de uma carga de tração continuamente crescente.

$$Q_m = A \cdot c + B \cdot \gamma \cdot H$$

Equação 2.2

Onde Q_m é a tensão máxima transmitida ao solo pela hélice, A e B são coeficientes de dimensionamento dependentes do ângulo de atrito interno do solo (Figura 2.5), c a coesão, γ o peso específico do solo acima da hélice e H a profundidade da hélice.

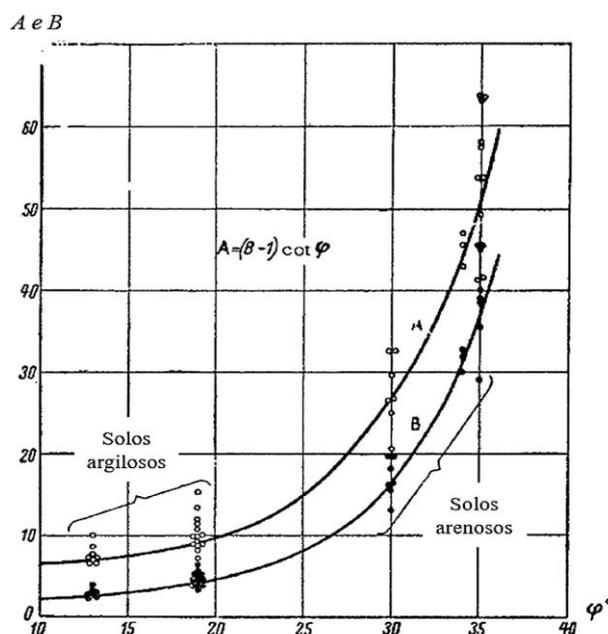


Figura 2.5 – Coeficientes de dimensionamento A e B (TROFIMENKOV; MARIUPOL'SKII, 1964)

Finalmente, a capacidade de carga à tração é definida como a soma da capacidade de carga da hélice com a resistência por atrito lateral no fuste da estaca (Equação 2.3).

$$Q_u = Q_m \cdot F + f \cdot P_s \cdot L'$$

Equação 2.3

Sendo:

$$L' = L - D = \frac{H}{\sin \alpha} - D$$

Equação 2.4

Onde:

- Q_u : Capacidade de carga à tração;
- Q_m : Tensão máxima transmitida ao solo pela hélice;
- F : Área da hélice;
- f : Resistência por atrito unitária no fuste (GOSSTROY, 1985);
- P_s : Perímetro do fuste;
- L' : Comprimento efetivo do fuste;
- D : Diâmetro da hélice;
- H : Profundidade de instalação;
- α : Ângulo entre o eixo da estaca e a horizontal.

2.3.2. Estacas helicoidais com múltiplas hélices

Existem três principais métodos para a previsão da capacidade de carga em estacas helicoidais, que são: método do cilindro de cisalhamento, método das capacidades individuais (Figura 2.6) e o método empírico. Costa (2017b) cita que tanto o método do cilindro de cisalhamento como o método das capacidades individuais devem ser usados para prever a capacidade teórica de estacas helicoidais submetidas à tração, e que o menor valor deve ser usado como a capacidade final prevista da estaca.

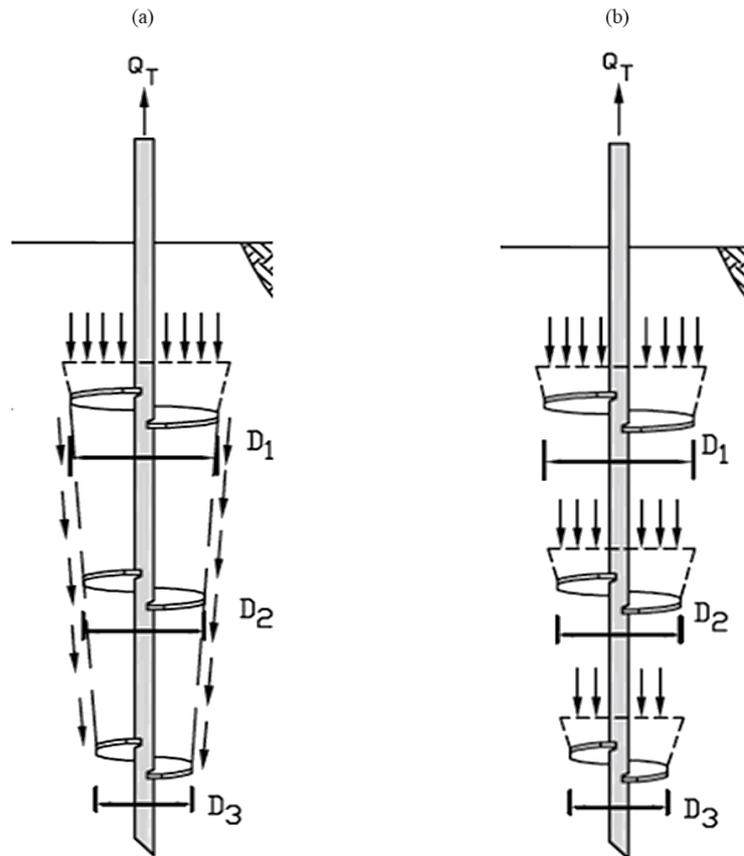


Figura 2.6 – Previsão da capacidade de carga à tração: (a) Método do cilindro de cisalhamento; (b) Método das capacidades individuais (A. B. CHANCE CO., 2014)

2.3.2.1. Método do cilindro de cisalhamento

Este método foi desenvolvido por Mitsch e Clemence (1985) para estacas helicoidais em areia. No método do cilíndrico de cisalhamento, assume-se a formação de uma superfície de ruptura entre as hélices de superior e inferior, de formato cilíndrico. Dependendo da razão entre a profundidade de assentamento e o diâmetro da hélice superior (razão crítica) o mecanismo de ruptura pode apresentar duas configurações. Quando a hélice superior se encontra em uma posição relativamente elevada, onde a superfície de ruptura cônica que se forma acima desta atinge a superfície do terreno, ocorre o que se chama de ancoragem rasa. Já a chamada ancoragem profunda ocorre quando a hélice se encontra em uma profundidade maior e a superfície de ruptura cônica não atinge a superfície do terreno.

De acordo com Mitsch e Clemence (1985), a razão crítica tem o valor próximo de 5. A partir de análises numéricas validadas por dados de campo coletados no mesmo local da presente pesquisa, Costa (2017b) encontrou uma razão em torno de 4. Das (1990), por sua vez, correlaciona tal razão com o ângulo de atrito interno do solo (Figura 2.7).

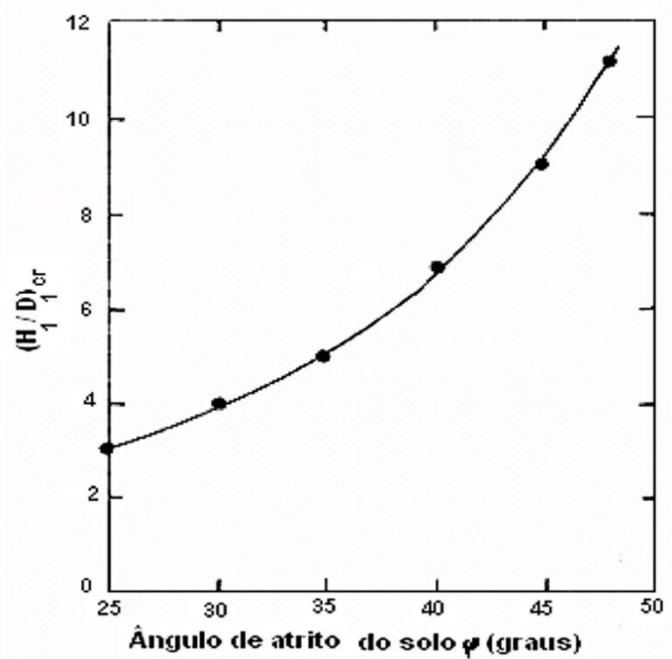


Figura 2.7 – Relação entre razão crítica e o ângulo de atrito interno do solo (DAS, 1990)

Para ancoragens rasas fundadas em areia (Figura 2.8), Mitsch e Clemence (1985) estimaram a carga de ruptura com base na Equação 2.5.

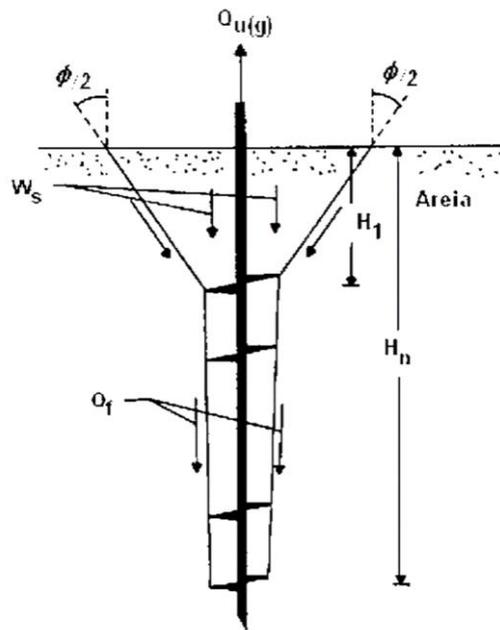


Figura 2.8 – Superfície de ruptura para estaca helicoidal rasa (DAS, 1990)

$$Q_u = \overbrace{(Q + W_s)}^{Q_p} + Q_f$$

Equação 2.5

Onde, Q_u é a capacidade de carga à tração, Q_p a resistência à ruptura acima da hélice de topo, Q_f a resistência por atrito na superfície cilíndrica formada entre as hélices de ponta e de topo e W_s o peso do solo dentro da superfície de ruptura.

A resistência à ruptura acima da hélice de topo (Q_p) é dada pela Equação 2.6.

$$Q = \pi \cdot \gamma' \cdot K_u \cdot \tan \varphi \cdot [\cos^2(\varphi/2)] \cdot \left[\frac{D_1 \cdot H_1^2}{2} + \frac{H_1^3 \cdot \tan(\varphi/2)}{3} \right]$$

Equação 2.6

Por sua vez, a resistência por atrito na superfície cilíndrica formada entre as hélices de ponta e de topo (Q_f) é expressa pela Equação 2.7.

$$Q_f = \frac{\pi}{2} \cdot D_a \cdot \gamma' \cdot (H_n^2 - H_1^2) \cdot K_u \cdot \tan \varphi$$

Equação 2.7

Sendo:

$$D_a = \frac{(D_1 + D_n)}{2}$$

Equação 2.8

Finalmente, o peso do solo dentro da superfície de ruptura (W_s) é dado pela Equação 2.9.

$$W_s = \gamma' \cdot \left\{ \frac{\pi}{3} \cdot H_1 \cdot [D_1^2 + (D_1 + 2H_1 \cdot \tan(\varphi/2))^2 + D_1 \cdot (D_1 + 2H_1 \tan(\varphi/2))] \right\}$$

Equação 2.9

Onde:

- H_1 : Distância entre a hélice do topo e o nível do terreno;
- D_1 : Diâmetro da hélice do topo;
- H_n : Distância entre a hélice da ponta e o nível do terreno;
- D_n : Diâmetro da hélice da ponta;
- γ' : Peso específico efetivo do solo;
- φ : Ângulo de atrito do solo;

- K_u : Coeficiente de empuxo na ruptura à tração;
- D_a : Diâmetro médio das hélices.

Para o coeficiente de empuxo na ruptura à tração (K_u), Mitsch e Clemence (1985) recomendam os valores conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de K_u para alguns valores de ϕ (MITSCH; CLEMENCE, 1985)

Ângulo de atrito do solo (ϕ)	Valores de K_u
25	0,70
30	0,90
35	1,50
40	2,35
45	3,20

Partindo para as ancoragens profundas (Figura 2.9), Mitsch e Clemence (1985) adicionaram uma variável correspondente a resistência por atrito entre o tubo da estaca e solo acima da hélice do topo (Q_s) na Equação 2.5. Desse modo, para esse tipo de ancoragem é empregada a Equação 2.10.

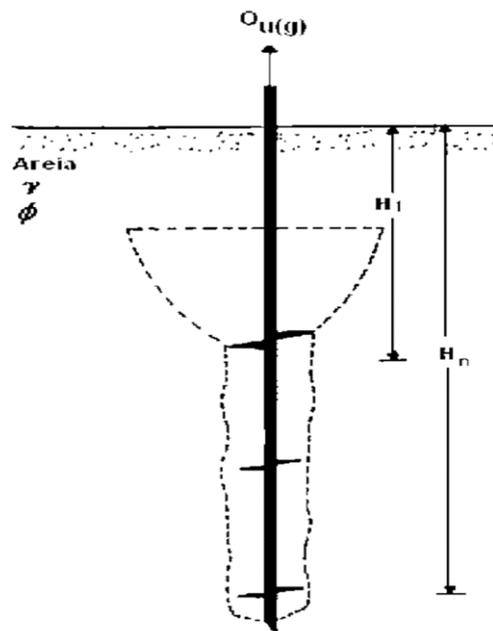


Figura 2.9 – Superfície de ruptura para estaca helicoidal profunda (DAS, 1990)

$$Q_u = Q_p + Q_f + Q_s$$

Equação 2.10

Onde, Q_u é a capacidade de carga à tração, Q_p a resistência à ruptura acima da hélice de topo, Q_f a resistência por atrito na superfície cilíndrica formada entre as hélices de ponta e de topo e Q_s a resistência por atrito entre o tubo da estaca e solo acima da hélice do topo.

A resistência à ruptura acima da hélice de topo (Q_p) é dada pela Equação 2.11.

$$Q_p = \frac{\pi}{4} \cdot N_{qu} \cdot \gamma' \cdot D_1^2 \cdot H_1$$

Equação 2.11

A resistência por atrito na superfície cilíndrica formada entre as hélices de ponta e de topo (Q_f) é expressa também pela Equação 2.7.

Por fim, a resistência por atrito entre o tubo da estaca e solo acima da hélice do topo (Q_s) é dada pela Equação 2.12.

$$Q_s = P_s \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\gamma' \cdot H_1}{2} \right) \cdot K_u \cdot \tan \varphi$$

Equação 2.12

Onde:

- H_1 : Distância entre a hélice do topo e o nível do terreno;
- D_1 : Diâmetro da hélice do topo;
- γ' : Peso específico efetivo do solo;
- φ : Ângulo de atrito do solo;
- N_{qu} : Fator de capacidade de carga à tração;
- P_s : Perímetro do tubo da estaca;
- K_u : Coeficiente de empuxo na ruptura à tração.

Para o fator de capacidade de carga à tração (N_{qu}), Mitsch e Clemence (1985) recomendam os valores de Meyerhof e Adams (1968) expressos na Figura 2.10.

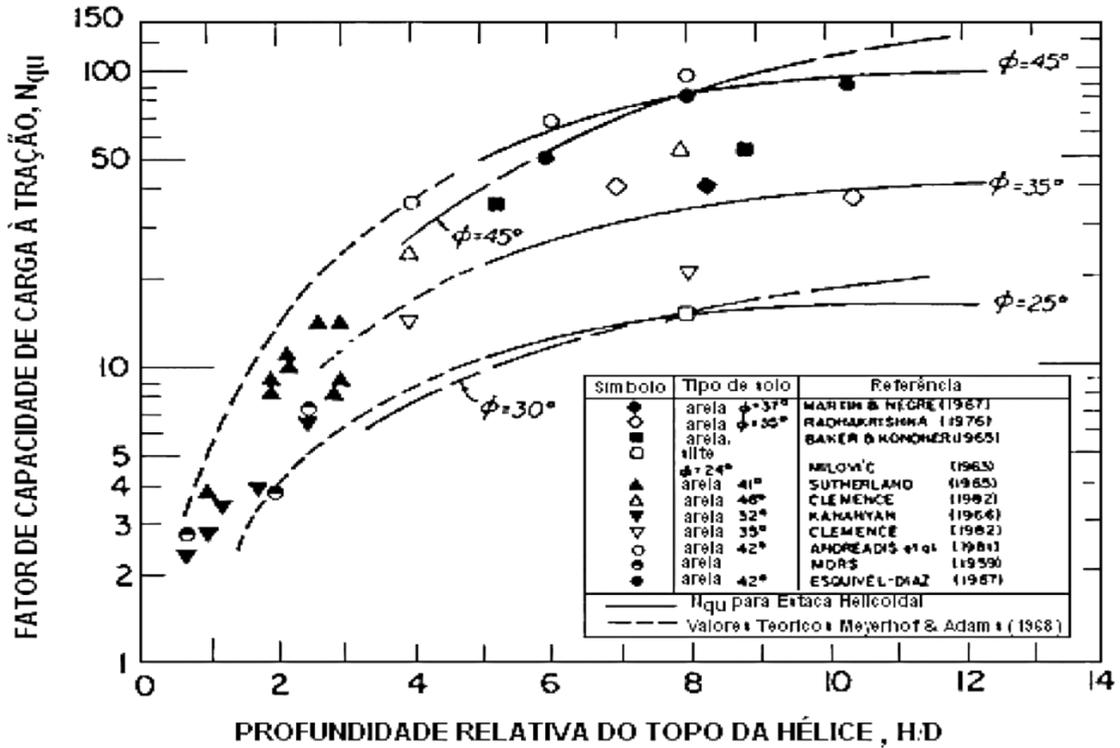


Figura 2.10 – Determinação do fator de capacidade de carga à tração (N_{qu}) (MITSCH; CLEMENCE, 1985)

2.3.2.2. Método das capacidades individuais

Segundo Meyerhof e Adams (1968), no método das capacidades individuais a resistência axial total é dada pela soma dos valores de capacidade de carga relativos a cada hélice, incluindo, em determinadas situações, a parcela de resistência provocada pelo fuste. De acordo com A. B. Chance CO. (2014), a capacidade de carga devido ao atrito ao longo do fuste da estaca é geralmente mobilizada somente se o diâmetro do eixo for de pelo menos 89 mm.

Stephenson (2003) menciona que o método de capacidades individuais é a adaptação da teoria da capacidade de carga tradicional, desenvolvida por Terzaghi, Meyerhof, Hansen e Vesic e propõem que o valor da capacidade de carga em areia seja dado pela Equação 2.13.

$$Q_u = \sum_{n=1}^n Q_n = \sum_{n=1}^n A_n \cdot q_n \cdot N_q$$

Equação 2.13

Onde:

- Q_u : Capacidade de carga à tração;
- Q_n : Capacidade de carga individual de cada hélice;
- n : Número de hélices;
- A_n : Área projetada da hélice;
- q_n : Tensão efetiva do solo acima da hélice;
- N_q : Fator de capacidade de carga do solo acima da hélice.

Os valores de N_q recomendados por A. B. Chance CO. (2014) são apresentados na Figura 2.11.

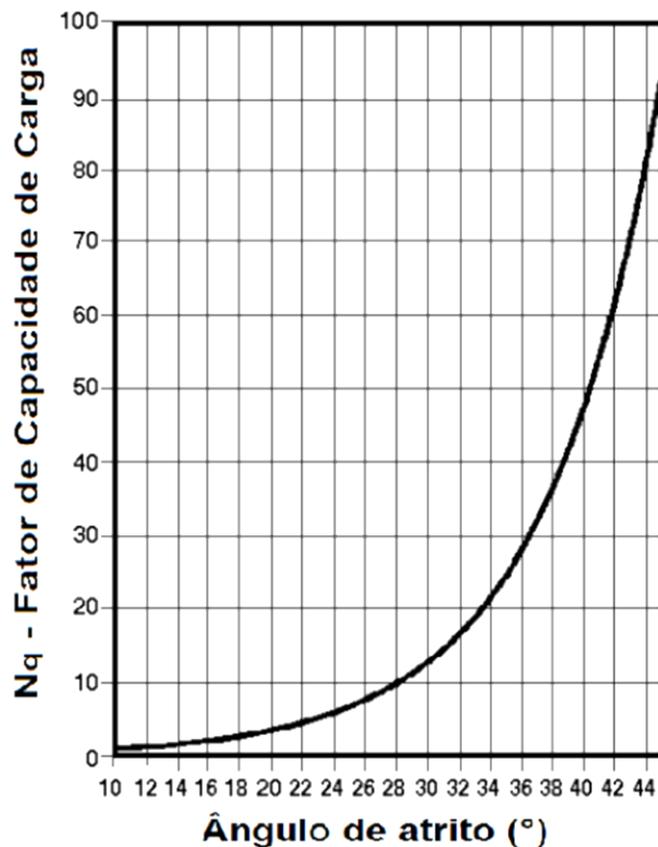


Figura 2.11 – Relação entre o fator de capacidade de carga e ângulo de atrito interno do solo (A. B. CHANCE CO., 2014)

Dependendo do espaçamento entre as hélices e das condições do subsolo, a estaca helicoidal pode apresentar ruptura de acordo com procedimentos referências ao método do cilindro de cisalhamento ou com base no método das capacidades individuais (MERIFIELD, 2011).

Tsuha (2007) afirma que para o método de capacidades individuais apresentar resultados coerentes se faz necessário que o espaçamento entre as hélices seja grande o suficiente para evitar a sobreposição das zonas de tensão. Sakr (2009), com base em resultados de ensaios de campo, sugeriu que o espaçamento deve ser de aproximadamente 3 vezes o valor do diâmetro da hélice, sendo esse valor também recomendado por A. B. Chance CO. (2014).

2.3.3. Método empírico

Os métodos empíricos calculam a capacidade de carga do sistema solo-estaca utilizando o torque de instalação medido e fatores empíricos desenvolvidos de relações estatísticas e de resultados relacionando o torque e a capacidade de carga de provas de carga.

A relação entre a capacidade de torque e a capacidade de carga da instalação é um método empírico originalmente desenvolvido pela A. B. Chance Company no final da década de 1950 e início da década de 1960. O princípio é que, quando uma estaca helicoidal é instalada no solo cada vez mais denso a resistência à instalação (chamada de energia de instalação ou torque) aumentará. Da mesma forma, quanto maior o torque de instalação, maior a capacidade de carga axial da estaca (A. B. CHANCE CO., 2014).

Hoyt e Clemence (1989) propuseram a Equação 2.14 que relaciona a capacidade final de uma estaca helicoidal ao seu torque de instalação.

$$Q_u = K_t \cdot T$$

Equação 2.14

Onde, Q_u é a capacidade de carga à tração, K_t o fator empírico de torque e T o torque final de instalação.

Os valores para o fator empírico encontrados por Hoyt e Clemence (1989) são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Fator empírico de torque (HOYT; CLEMENCE, 1989)

Diâmetro do fuste	K_t
< 89 mm	33 m ⁻¹
89 mm	23 m ⁻¹
219 mm	9,8 m ⁻¹

Queiroz (2018) obteve para estacas helicoidais com diâmetro de fuste de 73,0 mm o fator empírico de torque de $11,4 \text{ m}^{-1}$.

Li e Deng (2018) confirmam que os valores de K_t diminuem quando o diâmetro do fuste aumenta. No entanto, cita que essa tendência pode se tornar inválida quando há uma mudança drástica na resistência do solo próximo da hélice. Alguns autores (SANTOS FILHO, 2014; QUEIROZ, 2018) mostraram através de instrumentação que cada hélice apresenta um fator de torque diferente, tendendo o K_t a ser maior nas hélices mais acima e menor nas hélices mais profundas.

2.4. Fator de segurança

Os fatores de segurança geralmente utilizados em estacas carregadas à tração ou compressão variam entre 1,5 e 3,0 (USACE, 1991). De acordo com Perko (2009), um fator de segurança de 3,0 é comumente utilizado em cálculos de capacidade de carga e projetos de estacas helicoidais. No entanto, quando são realizados ensaios para verificar a capacidade de carga final da estaca, um fator de segurança de 2,0 é mais comum. Ele ainda cita que um fator de segurança de 1,5 pode ser usado quando uma porcentagem significativa de estacas helicoidais é ensaiada.

Perko (2009) ainda verificou, com base em resultados de 112 ensaios de capacidade de carga, que se um fator de segurança de 2,0 for usado para prever a capacidade de carga teórica de uma estaca helicoidal, há uma probabilidade de 84% de que a capacidade real, medida no campo, exceda essa previsão.

2.5. Comportamento à carga cíclica

As estacas helicoidais são geralmente empregadas para resistir cargas de tração em estruturas como torres de comunicações, turbinas eólicas, dutos enterrados e estruturas *offshore*. Esses carregamentos, normalmente cíclicos, podem influenciar no comportamento e provocar ruptura por degradação da capacidade de carga desse tipo de fundação.

Ensaio realizados por Chan e Hanna (1980) mostraram que o comportamento à carga cíclica em estacas instaladas em areia é afetado pelo número e frequência de ciclos, pela carga média ($Q_{\text{média}}$) e pela amplitude cíclica ($Q_{\text{cíclica}}$). Esses parâmetros são mostrados na Figura 2.12.

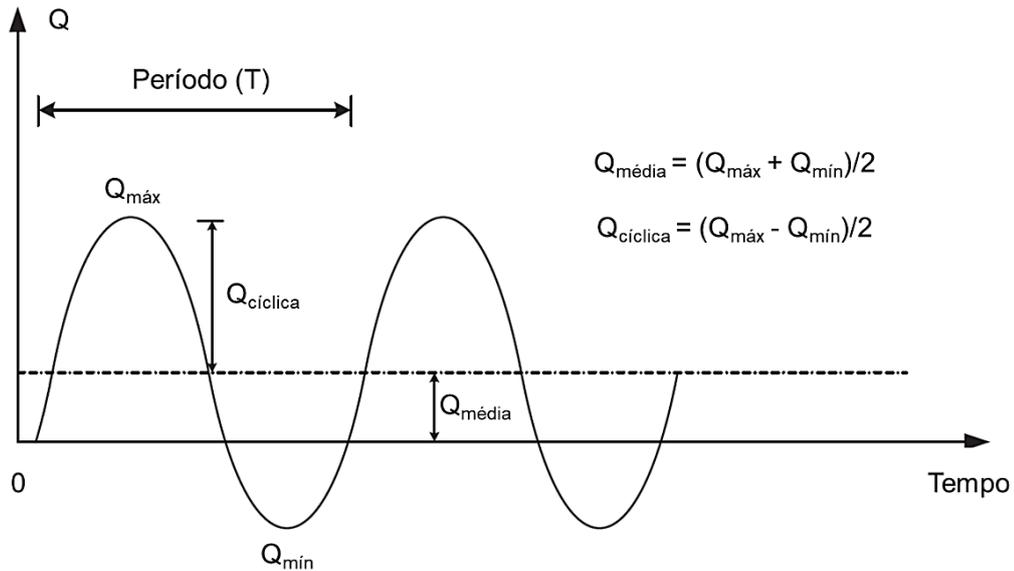


Figura 2.12 – Definições de carregamento cíclico (TSUHA *et al.*, 2012b)

De acordo com Andersen *et al.* (2013) a carga cíclica pode ser simétrica, quando a carga média é nula, mas frequentemente é unidirecional — amplitude cíclica menor que a carga média — ou bidirecional — amplitude cíclica maior que a carga média. Jardine e Standing (2012) mostraram que o ciclo sob condições unidirecionais e bidirecionais possuem características bastante diferentes. Segundo eles, o último apresenta níveis de carga cíclicos normalizados mais elevados e promovem perdas cíclicas mais severas, enquanto o primeiro apresenta um estilo de degradação menos simétrico e mais progressivo.

Além disso, os ciclos podem ser considerados quase-estáticos ou dinâmicos. No primeiro, os ciclos são aplicados com uma baixa frequência de carga, onde as forças de inércia não são consideradas ou são desprezíveis, já no segundo, a frequência de carregamento é maior e as forças de inércia relevantes (WICHTMANN, 2005). O ciclismo de baixo nível pode ter efeitos benéficos sobre a capacidade de carga da estaca, podendo as estacas se auto recuperar com o tempo após perdas modestas da capacidade cíclica. Jardine e Standing (2012) citam ganhos de até 20% na capacidade de carga após a aplicação de carga cíclica estável em estacas. Por sua vez, o carregamento cíclico de alto nível pode ter um impacto muito significativo na capacidade do fuste.

As técnicas destinadas a explorar os efeitos de carga cíclica são geralmente restritas. A prática mais comum é impor ciclos uniformes com séries de carga ou deslocamento que empregam uma frequência fixa e amplitude regular, conduzidos com base no número e frequência dos ciclos, no período, na carga média e a amplitude cíclica, ou seus deslocamentos equivalentes (ANDERSEN *et al.*, 2013).

2.5.1. Estabilidade à carga cíclica

Para a avaliação da estabilidade de estacas submetidas a carregamento cíclico, diversos autores, como Karlsrud *et al.* (1986) e Poulos (1988), recomendam a utilização de diagramas de interação. Esses diagramas de estabilidade cíclica consideram os efeitos de interação de cargas cíclicas e médias e o número de ciclos aplicados. Tais diagramas de interação são zoneados em três regiões: uma região ciclicamente estável onde não há redução da capacidade de carga após os ciclos, uma área metaestável onde ocorre alguma redução da capacidade de carga após os ciclos e uma zona instável onde a ruptura cíclica se desenvolve dentro de um pequeno número especificado de ciclos.

Na zona estável, os deslocamentos da cabeça acumulam-se lentamente ao longo de centenas de ciclos, sob carga unidirecional (com cargas de tração ou compressão aplicadas) ou carga dupla (envolvendo tração seguida de cargas de compressão aplicadas ou vice-versa, passando por carga zero durante cada ciclo). Nessa zona, a ruptura cíclica desenvolve-se no intervalo de $N > 1000$.

Na zona metaestável, os deslocamentos da cabeça da estaca acumulam-se em taxas moderadas ao longo de dezenas a centenas de ciclos sem estabilização e a ruptura cíclica desenvolve-se no intervalo de $100 \leq N \leq 1000$.

Finalmente, na zona instável os deslocamentos se desenvolvem rapidamente sob condições unidirecionais ou bidirecionais, levando à ruptura no intervalo de $N < 100$ e às acentuadas perdas de capacidade do eixo.

Tsuha *et al.* (2012b) investigaram o comportamento das estacas helicoidais em areia sob carregamento axial cíclico. A partir dos ensaios, os autores propuseram um diagrama de interação para identificar categorias de cargas cíclicas, associando-os com as taxas de acúmulo de deslocamento (Figura 2.13).

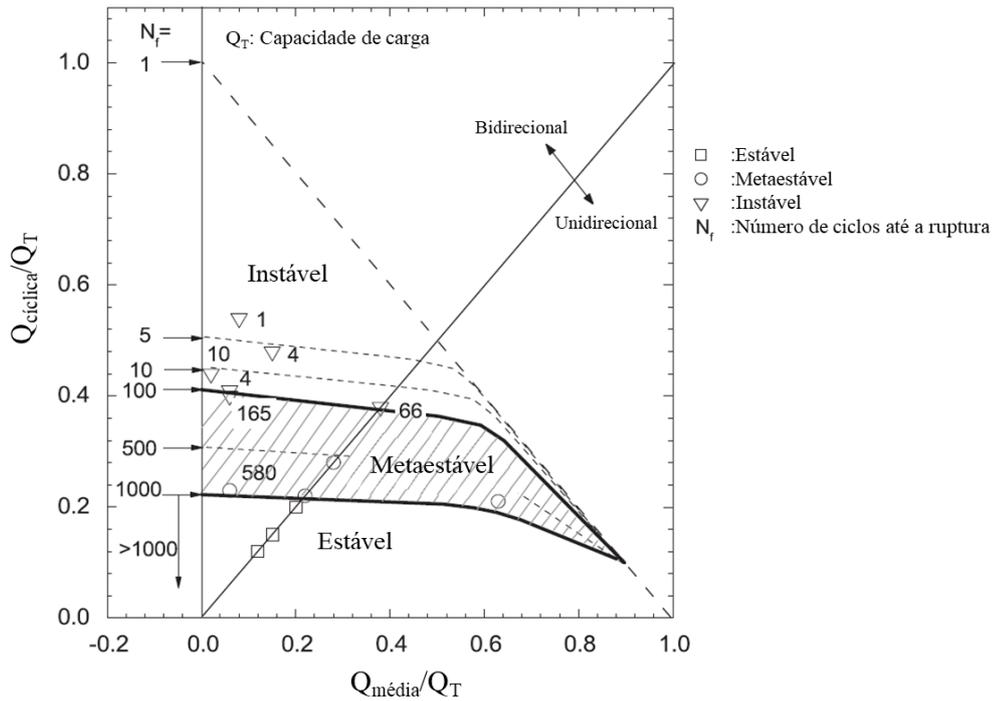


Figura 2.13 – Diagrama de interação cíclica (TSUHA *et al.*, 2012b)

Schiavon (2016), a partir dos resultados experimentais em centrífuga, elaborou um diagrama de interação mostrando as diferentes condições de estabilidade cíclica (Figura 2.14) que leva em consideração um deslocamento acumulado limite de 10% do diâmetro da hélice.

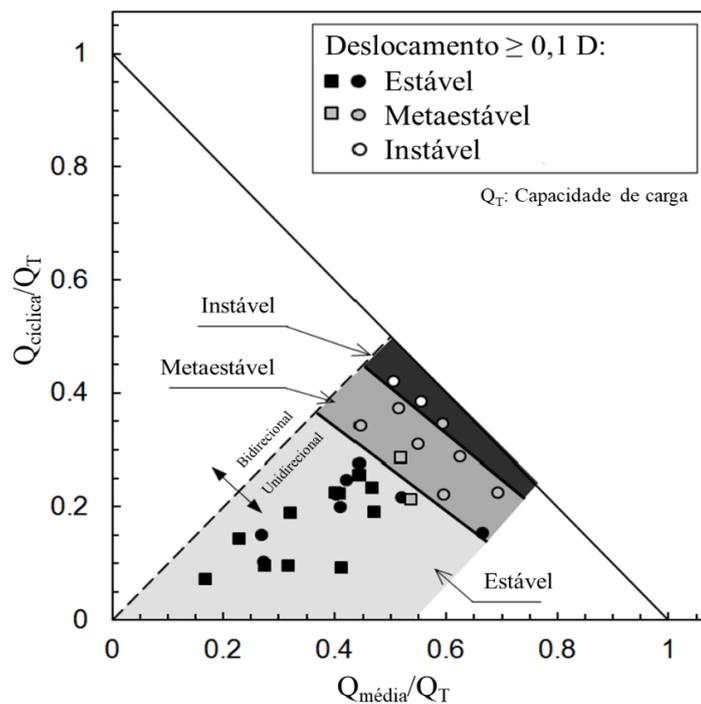


Figura 2.14 – Diagrama de interação cíclica (SCHIAVON, 2016)

Costa (2017b) cita que a estabilidade possui elevada dependência da amplitude cíclica. Em suas pesquisas, cargas estáveis, metaestáveis e instáveis foram alcançadas com amplitudes cíclicas inferiores a 10%, entre 10% e 30% e acima de 30% da capacidade de carga à tração estática, respectivamente.

2.5.2. Efeitos de cargas cíclicas no comportamento das estacas helicoidais

Tsuha *et al.* (2012a) verificaram que efeitos de carga cíclicas, que são frequentemente negligenciados em projetos, podem impactar fortemente o comportamento da fundação. Menciona ainda que o carregamento vertical cíclico reduz a resistência ao atrito das estacas, o que também afeta a capacidade de suporte e a resistência à tração. Além disso, perceberam que os ciclos estáveis levaram a ganhos de capacidade carga, enquanto aumentos ou diminuições na capacidade de carga são possíveis com ciclos instáveis e metaestáveis.

D'Aguiar *et al.* (2011) identificaram dois tipos de taxas de degradação da resistência do fuste: não-lineares e lineares. No caso de taxas de degradação não-lineares, eles verificaram que o estado crítico foi abordado com a dilatação de uma fina camada ao redor da estaca. Portanto, no início de cada novo ciclo, o estado do solo se move em direção a linha de estado crítico e a uma situação menos densa. Já no caso de taxas de degradação linear, dependendo da amplitude da carga cíclica, o solo sofre compactação e dilatação e as tensões média e normal diminuem. Assim, o estado inicial do solo após cada ciclo se afasta mais da linha de estado crítica com o acúmulo progressivo de deformação volumétrica dilatada permanente e a tensão de cisalhamento diminui suavemente.

Partindo para as estacas helicoidais, Schiavon (2016) observou que o fator mais proeminente da capacidade de carga à tração de uma estaca helicoidal é a resistência ao cisalhamento do solo perturbado no cilindro acima das placas. Segundo ele, quando este tipo de fundação é submetido a cargas cíclicas, as forças de resistência se concentram na interface entre o solo intacto e o solo perturbado. Em um carregamento unidirecional, depois de um certo número de ciclos de carga (dependendo da amplitude cíclica), o solo perturbado no interior do cilindro será densificado. Já no caso bidirecional, a resposta depende da densificação no solo perturbado por cima das hélices, e no solo intacto sob a parte inferior placa. Além disso, expõe que movimento de elevação de uma estaca após a aplicação de uma carga de tração cíclica causa a formação de lacunas, que é maior nas amplitudes cíclicas maiores, e uma zona de areia menos densa abaixo da hélice (Figura 2.15).

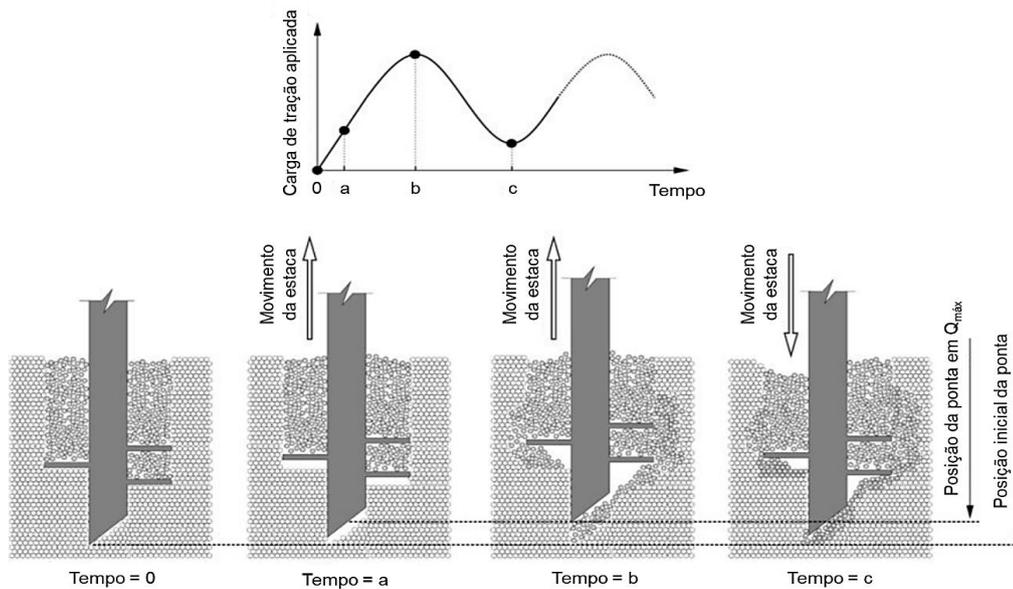


Figura 2.15 – Formação de lacunas e movimento de partículas de areia durante o carregamento cíclico (SCHIAVON, 2016)

Schiavon (2016) ainda mostra que o comportamento da ancoragem helicoidal é governado pela capacidade de suporte da hélice, como já mencionado anteriormente, e que a degradação na resistência do fuste é acentuada principalmente durante as primeiras 100 ciclos, quando a acumulação de deslocamento é mais significativa.

Um extenso programa de testes de campo também foi desenvolvido por Cerato e Victor (2009) para investigar os efeitos da carga cíclica em estacas helicoidais. Eles concluíram que cargas cíclicas podem, mesmo com a redução da parcela de contribuição do fuste, elevar as capacidades de carga à tração e minimizar a fluência a longo prazo devido ao aumento na mobilização das parcelas de resistência providas das hélices com o passar dos ciclos. Além disso, sugerem que o aumento da capacidade é consequência da compactação do solo durante o carregamento cíclico.

Costa (2017b), por sua vez, cita que o aumento da amplitude e da média das cargas tende a reduzir a estabilidade da estaca e a rigidez do sistema.

2.5.3. Rigidez cíclica

Rimoy *et al.* (2013) analisaram, através de vários ensaios de capacidade de carga cíclica intercalados com ensaios de capacidade de carga estática de referência, a rigidez e deslocamentos cíclicos associados. A rigidez cíclica é avaliada tendo como premissas as variáveis de rigidez cíclica de carga e rigidez cíclica de descarga.

A rigidez cíclica de carga e descarga pode convergir ou divergir. Rimoy *et al.* (2013) mostra que para as zonas estável e metaestável, a rigidez cíclica no carregamento permanece praticamente constante, sendo observando, no segundo caso, degradação em zonas próximas a ruptura. Já na zona instável, a rigidez cíclica no carregamento sofre degradação desde o estágio inicial.

Em relação a rigidez cíclica desenvolvida durante os estágios de descarregamento, nas zonas estáveis e metaestáveis, a situação é semelhante à de carregamento. Entretanto, na zona instável, enquanto a rigidez de carga se degrada com o ciclismo, a rigidez de descarga apresenta tendências constantes a ligeiramente mais rígidas (Figura 2.16). Rimoy *et al.* (2013) concluem que esta tendência é resultado da acumulação de deslocamentos plásticos na fase de carga e da diminuição dos deslocamentos elásticos recuperáveis na etapa de descarga.

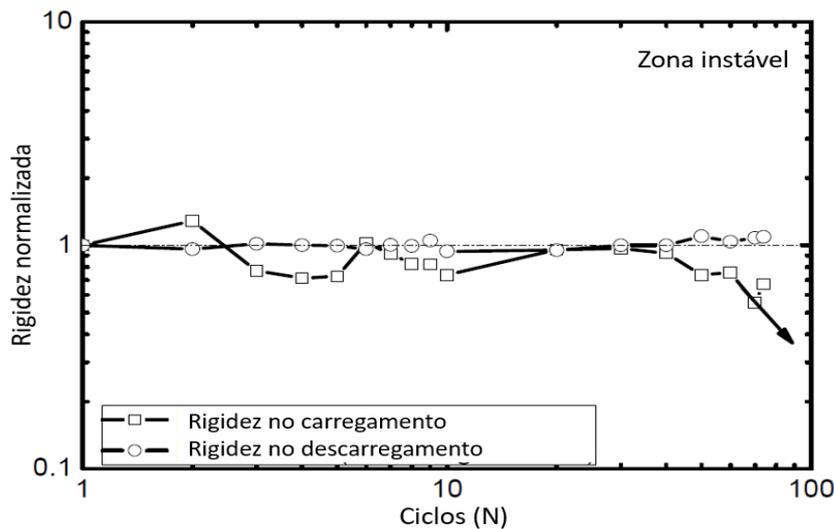


Figura 2.16 – Rigidez cíclica na zona instável (RIMOY, 2013)

Schiavon (2016) mostra que essa diferença se deve provavelmente da variação na carga média e da influência da amplitude cíclica, sendo esses fatores também observados por Rimoy (2013), que relatou variações principalmente com base na amplitude cíclica. Costa (2017b), por sua vez, relata uma tendência de diminuição da rigidez de carga e descarga com o aumento da amplitude cíclica.

2.5.4. Instrumentação em estacas helicoidais submetidas à carga de tração

Embora existam modelos empíricos e teóricos bem estabelecidos para estimar a capacidade de carga axial em estacas helicoidais, ainda existe uma escassez de dados providos

de ensaio de campo. Nesse cenário, a técnica de instrumentação está sendo cada vez mais empregada para investigar esse tipo de fundação.

Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014) instrumentaram e realizaram ensaios de capacidade de carga à tração em uma estaca helicoidal simples (única hélice) fundada em areia densa. A estaca foi instrumentada com extensômetros elétricos (*strain gages*) que permitiram avaliar a distribuição da carga ao longo da estaca. Os resultados revelaram que as hélices são responsáveis pela maior parte da resistência axial, sendo esse resultado também encontrado por Santos Filho (2014), Schiavon (2016) e Queiroz (2018), esse último verificando uma contribuição das hélices para a resistência global superior a 90%.

Carvalho (2007) analisou, através de instrumentação com extensômetros elétricos, a transferência de carga ao longo da estaca na prova de carga à tração. O gráfico com os diagramas é apresentado na Figura 2.17.

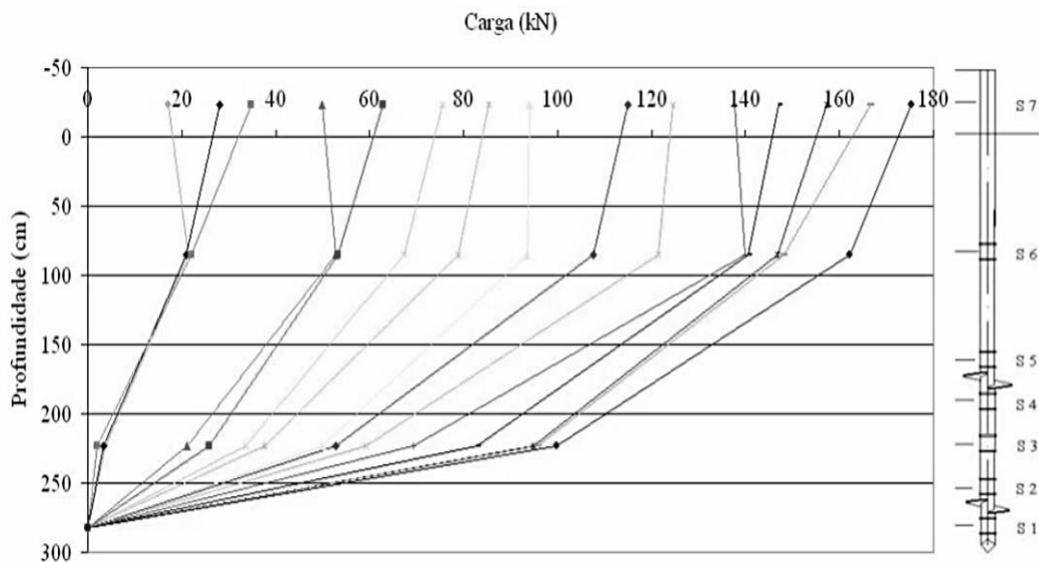


Figura 2.17 – Transferência de carga ao longo da estaca na prova de carga à tração (CARVALHO, 2007)

Carvalho (2007) demonstrou que a primeira hélice e o fuste resistem às cargas aplicadas inicialmente, com o passar dos estágios de carregamento se inicia a contribuição da segunda hélice e nos estágios finais, próximos da ruptura, a hélice inferior apresenta maior resistência. Sakr (2009) e Tsuha *et al.* (2012a) instrumentaram e mostraram que a maior parte da capacidade carga em estacas helicoidais é resistida pela hélice da ponta.

Queiroz (2018) verificou que nos deslocamentos iniciais a contribuição de resistência do fuste superior chega a 42% do total da carga, porém nos deslocamentos finais essa contribuição decresce para cerca de 4%. Nos deslocamentos finais, segundo Santos Filho

(2014), ocorre uma melhoria nas propriedades do solo o que faz as hélices trabalharem de forma similar.

Carvalho (2007) ainda cita que o fuste pode sofrer flexões dependendo de que parte da hélice está resistindo mais a carga e, por fim, menciona que a estaca sofre um esforço de torção contrário ao da instalação, o que provoca flexões ao longo do seu fuste.

Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014) encontraram uma considerável contribuição na capacidade de carga à tração nos deslocamentos iniciais, contudo com o aumento nos deslocamentos essa parcela de colaboração sofreu um decréscimo significativo (Figura 2.18). Li *et al.* (2018) observaram que essa ineficácia do fuste da estaca na capacidade de carga pode ser causada por planos ou fendas de tração de que se formam à medida que as estacas se movem para cima.

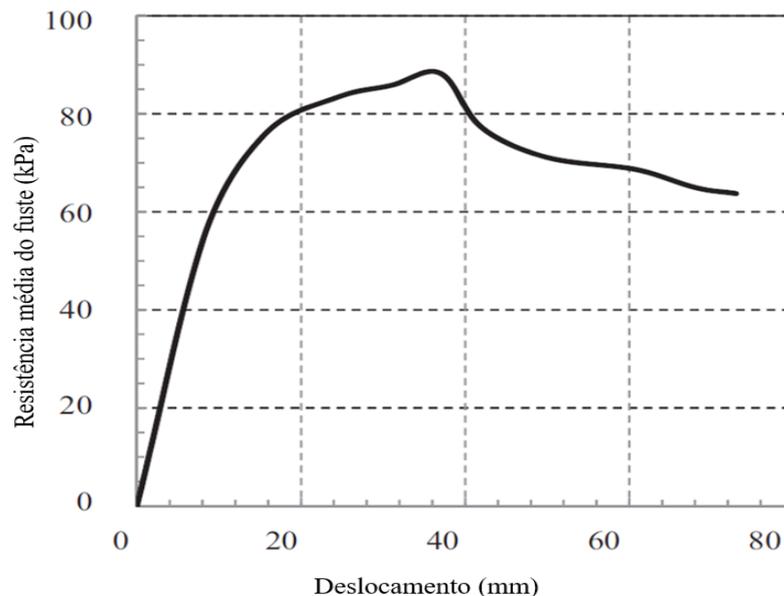


Figura 2.18 – Resistência média do fuste desenvolvida durante o ensaio com carga de tração (GAVIN; DOHERTY; TOLOOIYAN, 2014)

A partir disso, Li *et al.* (2018) também estimaram um comprimento da estaca que é ineficaz para capacidade de carga (Figura 2.19). Para solos arenosos, esse comprimento foi de aproximadamente 4,0 vezes o valor do diâmetro da hélice, estendendo-se da superfície do solo para baixo. Esse comprimento também foi investigado e confirmado através de modelagem numérica por Li e Deng (2018).

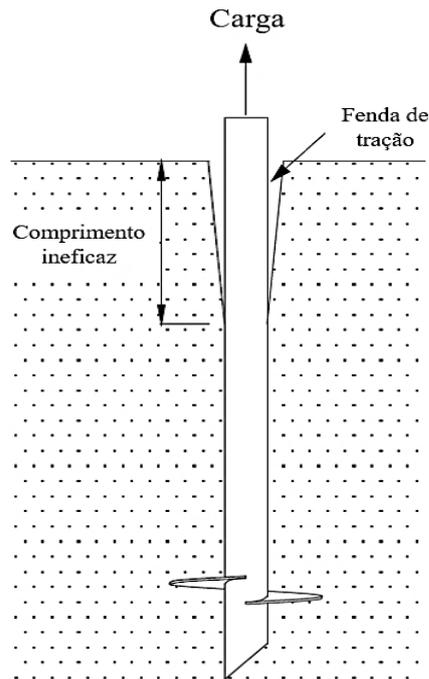


Figura 2.19 – Comprimento ineficaz (LI; DENG, 2018)

Urabe *et al.* (2015) investigaram o comportamento de estacas retas com placas (*wing plate*) quando solicitadas à carga de tração cíclica em solo arenoso. Com a instrumentação, eles verificaram que o carregamento cíclico reduz a contribuição do atrito lateral do fuste em aproximadamente 20% devido o mesmo causar diminuição da tensão efetiva ao redor da estaca. Além disso, verificaram que a resistência à tração das estacas com uma relação entre o diâmetro da hélice e do fuste de aproximadamente 1,5 diminui significativamente com o aumento do deslocamento vertical cíclico, no entanto com uma relação de 2,0 essa capacidade de carga não sofreu muita alteração.

2.6. Comportamento estático pós-cíclico

Podem ocorrer modificações no que se refere a capacidade de carga estática à tração de estacas helicoidais após a aplicação de cargas cíclicas. Schiavon (2016) executou quatro séries de ensaios com carga cíclica, intercalados com ensaios com carga de tração estática (após e antes de cada ensaios). Os resultados mostraram que, normalmente, o desempenho cíclico da estaca helicoidal é afetado pelos ensaios com carga estática antes realizados, porém não parecem afetar o comportamento estático pós-cíclico. O autor também mostra uma melhoria na capacidade de carga da estaca após cada ensaio estático, que, segundo ele, é causada pela compactação do solo acima das hélices (Figura 2.20).

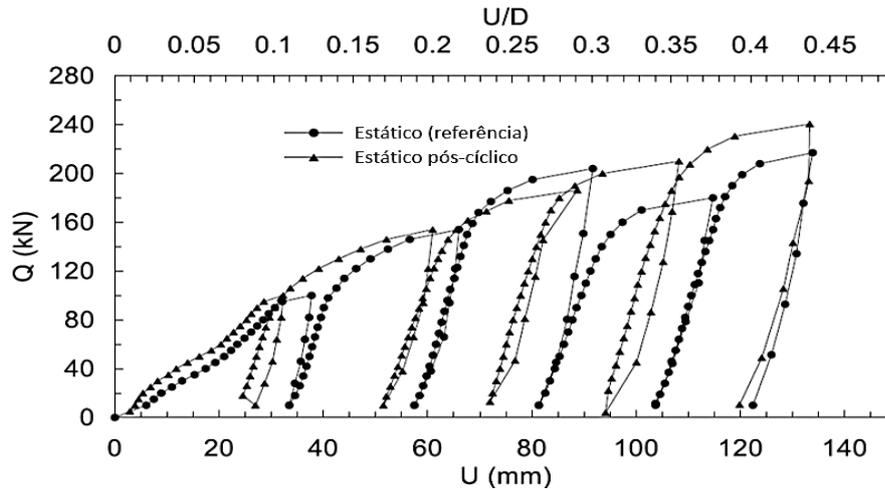


Figura 2.20 – Capacidade de carga estática pós-cíclica (SCHIAVON, 2016)

Costa (2017b) também verificou que a capacidade de carga estática do sistema aumentou em 6% após a aplicação dos carregamentos cíclicos quase-estáticos. Além disso, observou aumentos na rigidez do sistema solo-estaca após a aplicação dos ciclos.

Já em relação a resistência da hélice e do fuste, Schiavon (2016) verificou um aumento após cada ensaio estático, sendo observado um aumento maior da resistência do fuste para a estaca que experimentou cargas cíclicas e um aumento ligeiramente maior da resistência da hélice para a estaca que não sofreu cargas cíclicas.

Visando tais efeitos, Schiavon (2016) propôs a Equação 2.15, que relaciona a carga média, a amplitude cíclica e o número ciclos, para prever o fator de capacidade de carga pós-cíclica da hélice (N_{q-pc}). A equação é válida para o intervalo de $0,4 < Q_{média}/Q_T < 0,7$.

$$N_{q-pc}/N_q = -0,433(N/100) - 0,236(1/Q_{média})^2 + 0,285(1/Q_{cíclica})^2 + 98$$

Equação 2.15

Com os resultados, verificou que a capacidade pós-cíclica é mais dependente do número de ciclos (N) e da carga média ($Q_{média}$) e menos dependente da amplitude cíclica ($Q_{cíclica}$). Além disso, Schiavon (2016) cita que o comportamento cíclico das estacas helicoidais também deve ser avaliado, além da análise com base no deslocamento acumulado visto na Figura 2.14, quanto aos efeitos da carga cíclica na degradação da capacidade de carga. Com isso, elaborou um diagrama de interação que fornece a degradação pós-cíclica (Figura 2.21) e concluiu que a maioria das estacas que exibiu aumentos de capacidade pós-cíclicos foram submetidas a altas $Q_{médias}$ e $Q_{cíclicas}$ correspondentes às zonas metaestável e instável.

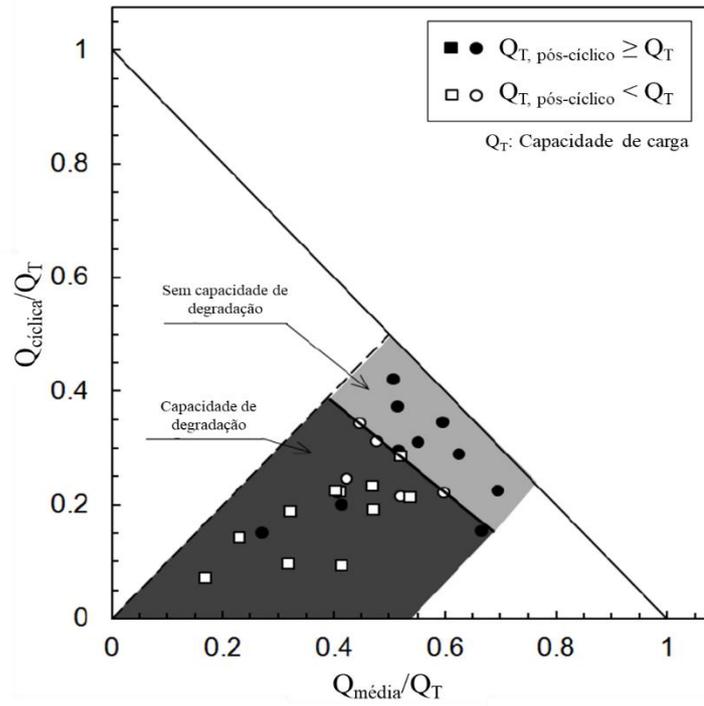


Figura 2.21 – Diagrama de interação de capacidade pós-cíclica (SCHIAVON, 2016)

3º CAPÍTULO: MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão abordados os procedimentos de instrumentação, calibração e instalação da estaca. Além disso, será apresentado o local de realização dos ensaios e suas características geológicas, os parâmetros geotécnicos do solo em que a estaca foi instalada e a descrição dos ensaios realizados na pesquisa.

Vale salientar que a pesquisa foi realizada utilizando-se um protótipo de uma estaca helicoidal projetado e construído por Costa (2017b) e instrumentado por Queiroz (2018).

3.1. Área experimental

Os ensaios foram realizados no Campus Universitário Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN (coordenadas UTM 255829.00 m E; 93544649.48 m S). A localização exata do campo experimental é mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Campo experimental (Adaptado do Google Earth)

A Figura 3.2 apresenta a delimitação do espaço onde foram executados os ensaios e a Figura 3.3 mostra a posição da sondagem e as localizações onde foram instaladas as estacas helicoidais.



Figura 3.2 – Delimitação do terreno experimental

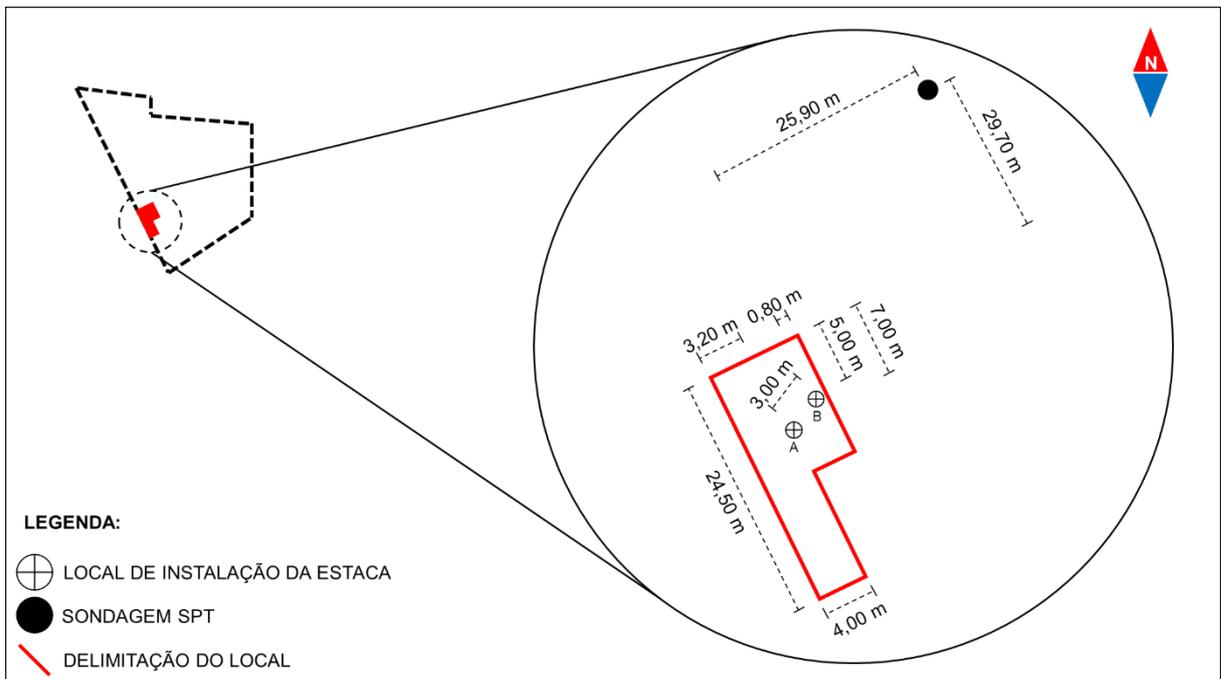


Figura 3.3 – Posição da sondagem e as localizações onde foram instaladas as estacas helicoidais

3.2. Características geológicas e geotécnicas do local

Nunes (1996), em suas pesquisas, identificou na cidade de Natal/RN três principais tipos de solos: areias quartzosas distróficas — solo com granulometria dominante de areia média a fina — areias quartzosas distróficas marinha — solo com granulometria fina à média — e latossolo vermelho-amarelo distrófico — solo com textura variada de acordo com os horizontes, ocorrendo arenosa a média nos horizontes superiores, textura argilosa nos horizontes inferiores.

Geomorfologicamente, de acordo com Silveira (1964), a cidade de Natal/RN enquadra-se na faixa conhecida como litoral nordestino ou das Barreiras, que é caracterizado pela presença de depósitos da Formação Barreiras, rochas praias e recifes. As rochas da Formação Barreiras ocorrem como uma superfície aplainada (denominada de tabuleiros) com o topo suavemente inclinado em direção ao Oceano Atlântico e frequentemente sob a forma de escarpas (falésias), definindo a linha de costa. Jesus (2002), por sua vez, cita que o solo é formado essencialmente por materiais de origem sedimentar do período terciário e quaternário.

No programa de investigação foram realizadas, ao lado do campo experimental, treze sondagens a percussão de simples reconhecimento com SPT de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001). As sondagens foram executadas em locais próximos obtendo, assim, perfis SPT semelhantes. A Figura 3.4 apresenta o resultado obtido na sondagem SP02 que foi considerado representativo para o solo do campo experimental. Não foi identificado o lençol freático.

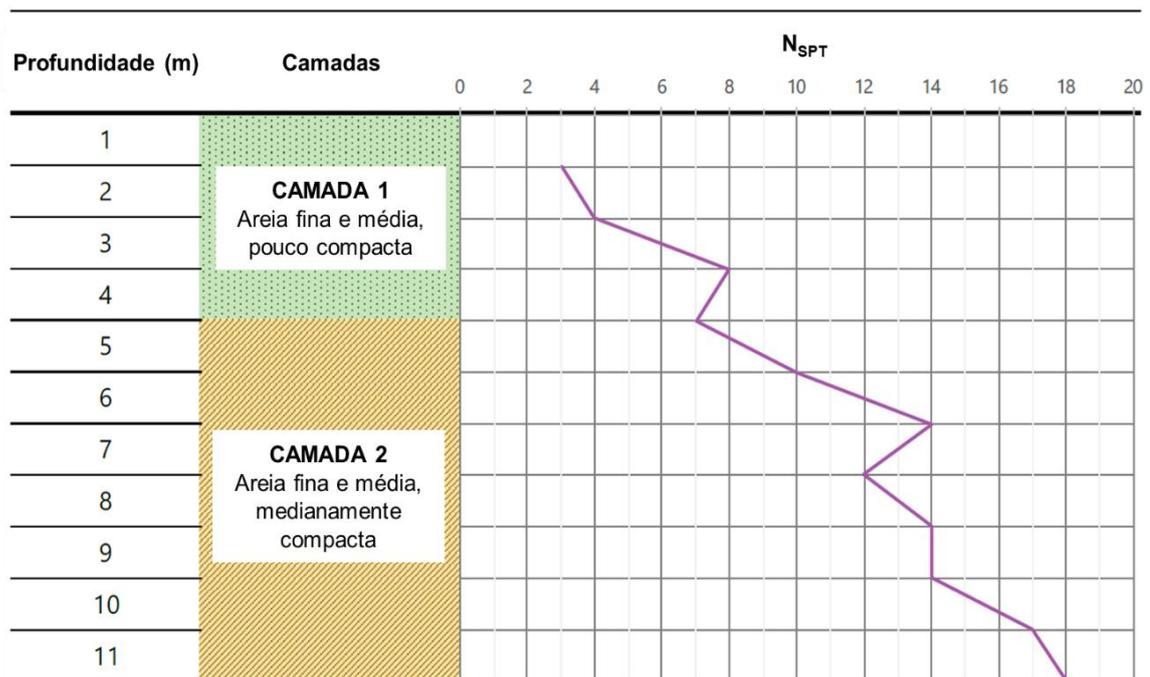


Figura 3.4 – Perfil do solo obtido do furo SP02 (COSTA, 2017b)

Logo após a realização dos ensaios de campo foram executadas escavações na área ensaiada (Figura 3.5). Com isso foi possível confirmar que o perfil de sondagem obtido no furo SP02 é realmente representativo para a análise do subsolo do campo experimental.



Figura 3.5 – Vista lateral de um corte após conclusão da última prova de carga (QUEIROZ, 2018)

Com o auxílio de um radargrama (Figura 3.6), obtido por meio da aquisição de sinais do Radar de Penetração no Solo (GPR) utilizado por Costa (2017a), foi possível perceber, a partir da profundidade de 2 m, a presença de uma camada de solo com propriedades eletromagnéticas diferentes da areia pura encontrada acima, indicado uma camada com capacidade de suporte elevada.

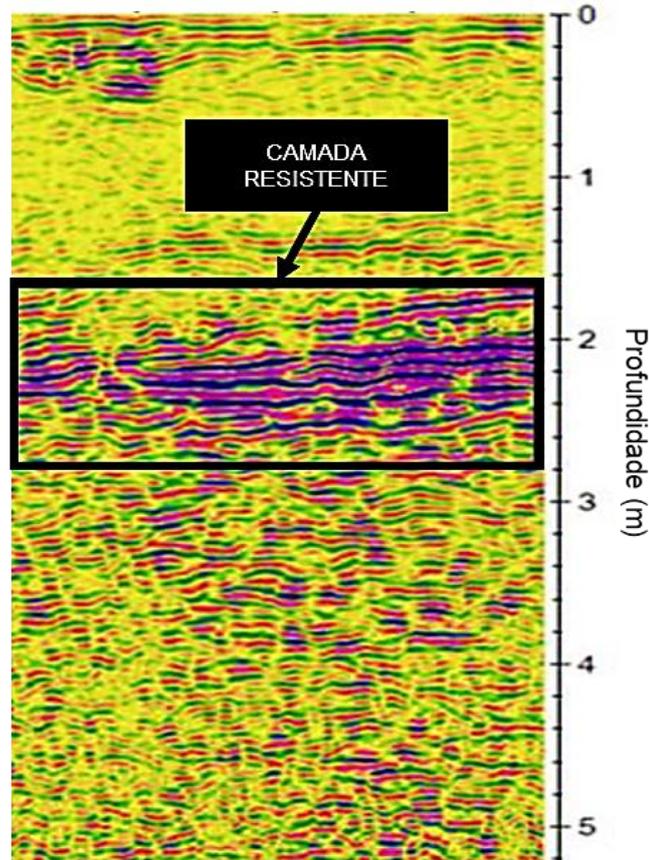


Figura 3.6 – Radargrama do local de instalação da estaca helicoidal (Adaptado de COSTA, 2017a)

Em relação aos parâmetros geotécnicos, Costa (2017b) constatou que o solo, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), é classificado como areia mal graduada, contendo 27% de areia fina, 72% de areia média, 1% de areia grossa. Além disso, o solo apresentou coeficiente de uniformidade de 1,96, coeficiente de curvatura de 0,99 e massa específica dos sólidos de 2,63 g/cm³. Ele também realizou ensaios de cisalhamento direto em duas amostras de solo que forneceram ângulo de atrito interno efetivo de 32,3° e 35,9° para densidades relativas de 34% e 71%, respectivamente.

Em relação ao peso específico e índice de vazios do solo, Costa (2017b) encontrou os dados expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Índice de vazios e peso específico do solo (COSTA, 2017b)

Índice de vazios mínimo	0,66	0,61
Índice de vazios máximo	0,85	0,85
Índice de vazios <i>in situ</i>	0,79	0,68
Peso específico seco mínimo (kN/m ³)	13,9	13,9
Peso específico seco máximo (kN/m ³)	15,4	16,0
Peso específico <i>in situ</i> (kN/m ³)	14,4	15,3
Densidade relativa	34%	71%

3.3. Informações sobre a preparação, instrumentação e calibração da estaca helicoidal

A estaca helicoidal utilizada na presente pesquisa é a mesma utilizada por Costa (2017b) em seu trabalho e as modificações necessárias para a preparação e instrumentação foram realizadas por Queiroz (2018). Foram instrumentadas, com extensômetros coláveis de resistência elétrica (*strain gages*), três seções ao longo da estaca adotando-se a nomenclatura de Seção 1 (S₁) a Seção 2 (S₂) e Seção 3 (S₃). A Figura 3.7 esquematiza a posição de cada seção instrumentada e as dimensões da estaca helicoidal.

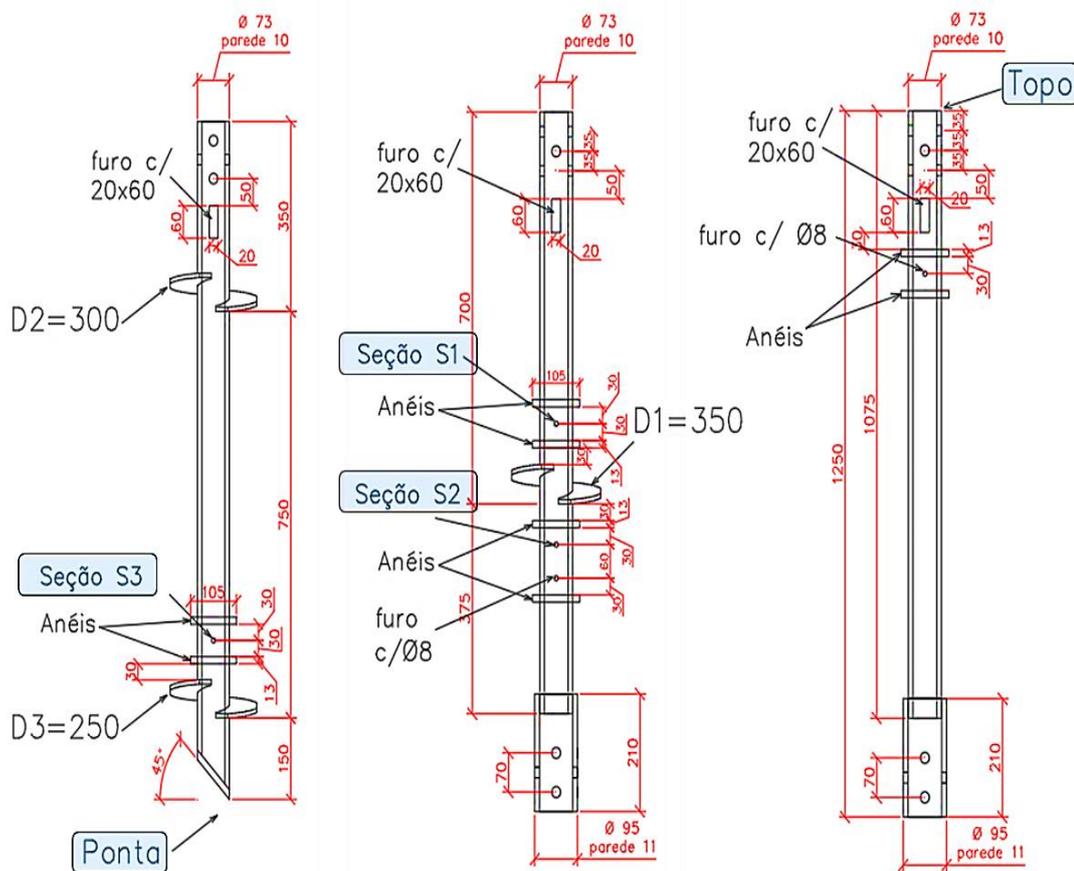


Figura 3.7 – Esquema da estaca helicoidal e localização das seções instrumentadas (QUEIROZ, 2018)

Para uma melhor confiabilidade dos dados, em todas as etapas de instrumentação o acabamento foi executado de forma minuciosa procurando reduzir as imperfeições, saliências e pequenas oxidações superficiais que pudessem interferir no aferimento dos dados.

A Figura 3.8 mostra a estaca helicoidal utilizada na pesquisa. A mesma foi fabricada por Costa (2017b), possui três hélices com diâmetros de 350 mm, 300 mm e 250 mm e resiste a 437 kN, quando verificada em relação ao escoamento da seção líquida do fuste, quando submetida a carregamento de tração. Os parafusos resistem 415 kN em cisalhamento e o ponto mais fraco é a solda das emendas, projetada para resistir 299 kN quando solicitada a carregamento de tração.



Figura 3.8 – Estaca helicoidal utilizada na pesquisa

O processo de calibração das seções instrumentadas (vide ANEXOS) se deu mediante aplicação de carga de tração e foi realizado por Queiroz (2018). Todos os detalhes acerca do projeto e confecção e da instrumentação do protótipo utilizado no trabalho podem ser encontrados em Costa (2017b) e Queiroz (2018), respectivamente.

3.4. Instalação da estaca helicoidal

A estaca helicoidal foi instalada verticalmente no solo com o auxílio uma perfuratriz hidráulica modelo MC150 fabricada pela CZM Foundation Equipment (Figura 3.9) que possui torque nominal máximo de 9,32 kN.m (CZM FOUNDATION EQUIPMENT, 2018).



Figura 3.9 – Perfuratriz hidráulica modelo MC150 (COSTA, 2017b)

Com a conexão alinhada, reta e rígida entre a estaca helicoidal e o motor, a inserção no solo se deu através da aplicação de torque (ou força de rotação) no topo da estaca até atingir o esforço máximo — devido a presença de uma camada resistente (vide Figura 3.6) — fornecido pela perfuratriz hidráulica. Foram feitas duas instalações, uma na posição A e uma na posição B, como mostrado na Figura 3.3, sendo mantida uma distância entre elas superior a cinco vezes o maior diâmetro das hélices para evitar interferência de uma instalação em outra (LIVNEH; EL NAGGAR, 2008).

As estacas foram inseridas no solo até uma profundidade de 2,57 m e 2,77 m nas posições A e B, respectivamente. Durante a instalação de cada segmento da estaca, os cabos da instrumentação eram conduzidos pelo interior da estaca e saíam pela abertura feita na parte superior de cada segmento.

3.5. Montagem dos ensaios de prova de carga à tração

Para a execução dos ensaios foram utilizados os seguintes aparatos:

- Duas vigas de aço com 3,0 m de comprimento apoiadas no solo;
- Duas vigas de aço com 6,0 m de comprimento apoiadas nas vigas de 3,0 m;
- Macaco hidráulico vazado com capacidade de 500 kN, ligado a uma bomba hidráulica manual, para aplicar as cargas durante os ensaios (Figura 3.11);
- Célula de carga com capacidade de 500 kN instalada acima do macaco hidráulico para medição da carga aplicada na estaca (Figura 3.11);
- Sistema de aquisição de dados para as leituras de carga e deformação provenientes da instrumentação;
- Quatro relógios comparadores, com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm, montados no fuste da estaca e apoiados em vigas metálicas de referência de 3,0 m de comprimento para a aferição dos deslocamentos verticais da estaca (Figura 3.11).

Toda a montagem e alguns equipamentos utilizados nos ensaios de prova de carga à tração são mostrados nas Figuras 3.10 e 3.11.



Figura 3.10 – Montagem dos ensaios de prova de carga à tração



Figura 3.11 – Equipamentos utilizados nos ensaios de prova de carga à tração

3.6. Execução dos ensaios de prova de carga à tração

Foram realizados dois ensaios com carga cíclica quase-estática, denominados ensaios A e B, sendo cada ensaio dividido em quatro etapas (01, 02, 03 e 04). Cada etapa durou uma hora no qual foram aplicados 60 ciclos, com um minuto cada, de carga e descarga.

Em cada ciclo, a carga aplicada oscilou entre os valores mínimo e máximo, entretanto foram utilizados incrementos de carregamento em condições diferentes. Como apresentado na Tabela 3.1, no Ensaio A foram aplicados incrementos crescentes de carregamento e no Ensaio B esses incrementos foram mantidos constantes. Na Tabela 3.2 e Figura 3.12 e na Tabela 3.3 e Figura 3.13 são mostrados todos os dados utilizados e a evolução das cargas aplicadas em cada etapa nos ensaios A e B, respectivamente.

Tabela 3.2 – Dados pretendidos no Ensaio A

Etapa	Q_{mín} (kN)	Taxa (kN)	Q_{máx} (kN)	Q_{média} (kN)	Q_{cíclica} (kN)	N	Período (s)
A-01	20	10	30	25	5	60	60
A-02	30	20	50	40	10	60	60
A-03	40	30	70	55	15	60	60
A-04	50	40	90	70	20	5	60

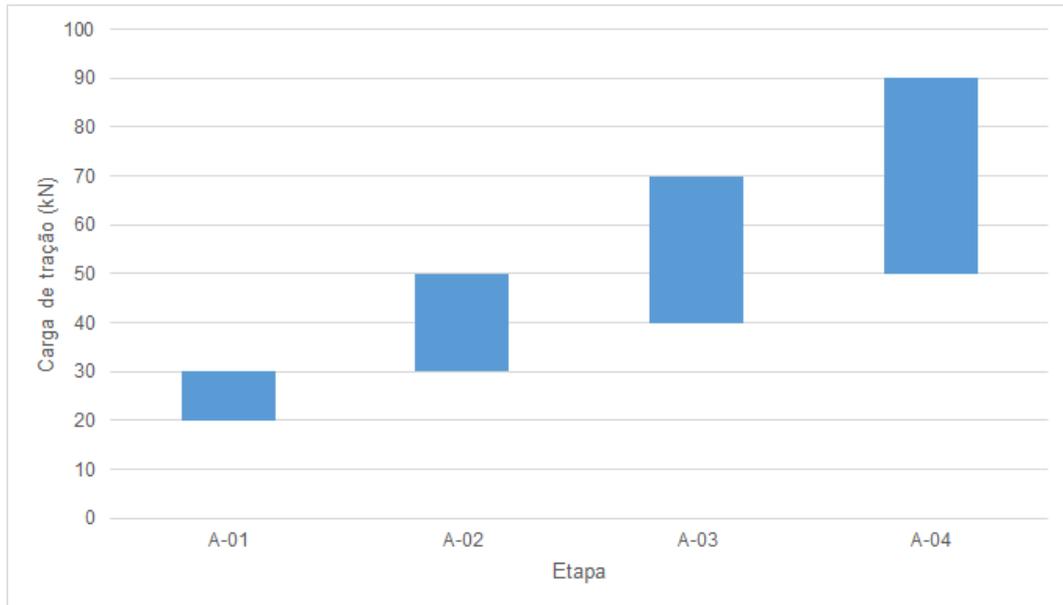


Figura 3.12 – Evolução das cargas aplicadas em cada etapa do Ensaio A

Tabela 3.3 – Dados pretendidos no Ensaio B

Etapa	Q _{mín} (kN)	Taxa (kN)	Q _{máx} (kN)	Q _{média} (kN)	Q _{cíclica} (kN)	N	Período (s)
B-01	10	20	30	20	10	60	60
B-02	30	20	50	40	10	60	60
B-03	50	20	70	60	10	60	60
B-04	70	20	90	80	10	60	60

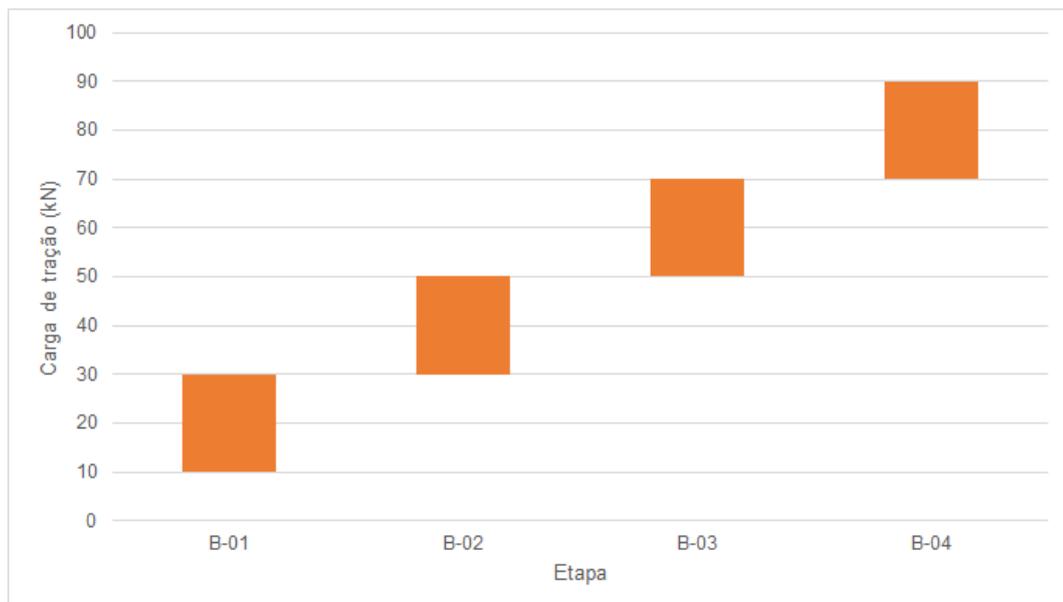


Figura 3.13 – Evolução das cargas aplicadas em cada etapa do Ensaio B

Logo após os ensaios com carga cíclica quase-estática foi realizado um ensaio com carga estática pós-cíclica, denominado Ensaio C, no mesmo local do Ensaio B. Os procedimentos seguidos para esse ensaio foram baseados nos ensaios com carregamento rápido e cíclico descritos na D3689M-07 (ASTM, 2013). O ensaio foi concluído após cinco ciclos de carga e descarga, com incrementos de 5 kN até a ruptura. O descarregamento foi aplicado em decrementos iguais a 20% da carga máxima atingida no ciclo. Durante cada intervalo de carga e descarga, a carga foi mantida constante por 10 minutos. Antes do ensaio, foi aplicada uma carga de aproximadamente 5% a 10% da carga de ruptura prevista para o assentamento do solo.

3.7. Resumo dos ensaios realizados

A Tabela 3.4 mostra o resumo dos ensaios realizados no trabalho, apresentando a localização, o tipo e o número de ciclos empregados.

Tabela 3.4 – Resumo dos ensaios realizados

Ensaio	Posição	Tipo	Número de ciclos
A	A	Quase-estático	4 x 60
B	B	Quase-estático	4 x 60
C	B	Estático	5

No total, foram realizadas três provas de carga à tração, sendo duas com carregamento cíclico quase-estático e uma com carregamento estático. Os ensaios com carregamentos quase-estáticos foram feitos com valores diferentes de carga cíclica média e amplitude de carga.

4º CAPÍTULO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo expõe e discute os resultados dos ensaios com carga de tração cíclica quase-estática, verificando a distribuição de esforços desenvolvido ao longo da estaca e, além disso, apresenta os apontamentos sobre o ensaio estático pós-cíclico.

4.1. Profundidade de instalação

Utilizando uma rotação de aproximadamente 40 rpm e uma taxa de penetração de 25 mm por rotação, a estaca foi instalada no solo até a recusa. Com o passo das hélices, que corresponde a uma penetração ideal por revolução completa, de 75 mm, a taxa de penetração de campo resultou em um Fator de Perturbação de Instalação (LUTENEGGER *et al.*, 2014), dado pela razão entre o passo das hélices e a taxa de penetração por rotação, de 3. Esse valor é considerado superior aos recomendados, sendo isso associado a baixa capacidade do motor de torque da perfuratriz utilizada na instalação.

Mesmo empregando a maior taxa de rotação e a menor taxa de penetração, procedimento não vantajoso que pode causar perturbações significativas do solo ao redor da estaca e reduzir sua capacidade de carga, não foi possível instalar a estaca em maiores profundidades, o que resultou numa instalação de ancoragem rasa, com razão H_1/D_1 menor que 4.

Após o processo de instalação, a profundidade atingida pelas hélices H_1 , H_2 e H_3 , que são respectivamente as hélices do topo, meio e ponta, bem como a relação entre H_1 e o diâmetro da hélice de topo D_1 , são apresentadas na Tabela 4.1. Já a Tabela 4.2 mostra a profundidade de cada seção instrumentada (S) após a instalação.

Tabela 4.1 – Profundidade das hélices após a instalação

Localização	H_1 (m)	H_1/D_1	H_2 (m)	H_3 (m)
A	0,84	2,40	1,60	2,35
B	1,04	2,97	1,80	2,55

Tabela 4.2 – Profundidade das seções instrumentadas após a instalação

Localização	S_1 (m)	S_2 (m)	S_3 (m)
A	0,77	0,98	2,28
B	0,97	1,18	2,48

4.2. Ensaio com carga cíclica quase-estática

Foram realizados dois ensaios (A e B) de carga cíclica quase-estática, sendo os mesmos divididos em quatro etapas (01, 02, 03, 04). Nas Figuras 4.1 e 4.2 é mostrado o comportamento da carga e do deslocamento ao longo do tempo nos Ensaio A e B, respectivamente. Como mencionado anteriormente, no Ensaio A foram aplicados incrementos crescentes de carregamento e no Ensaio B esses foram mantidos constantes.

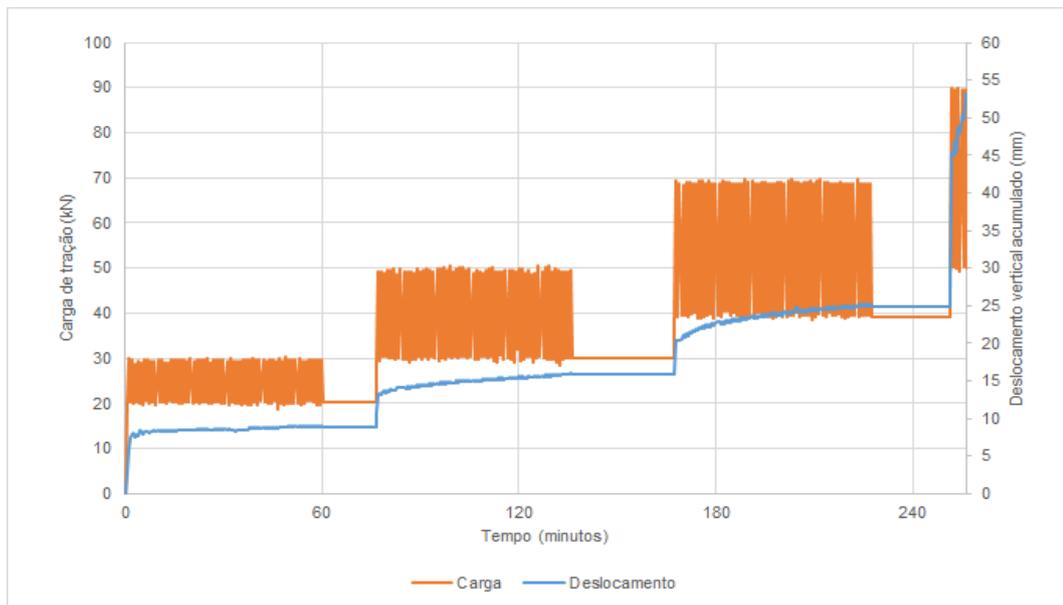


Figura 4.1 – Ensaio com carregamento quase-estático A

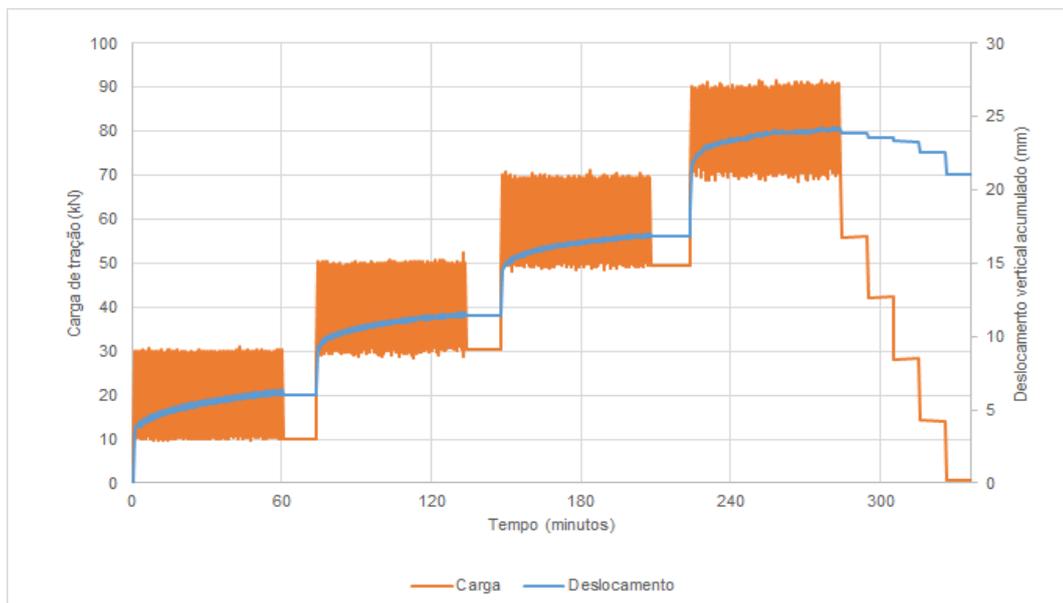


Figura 4.2 – Ensaio com carregamento quase-estático B

Na Tabela 4.3 são mostrados valores de carga mínima e máxima, carga média e amplitude cíclica obtidos durante o ensaio, bem como uma carga denominada carga de interação. A carga de interação aparece quando a carga mínima de uma etapa é menor que a carga máxima da etapa anterior. Nessa situação, parte da carga aplicada em uma nova etapa consiste em um recarregamento, o que pode aumentar a rigidez do solo e reduzir os deslocamentos correspondentes.

A carga de interação foi determinada para cada etapa dos ensaios e normalizada pela diferença entre as cargas máxima e mínima. O parâmetro $Q_{\text{interação}}/Q_{(\text{máx-mín})}$, chamado de fator de interação, mostra exatamente a quantidade de carga que uma etapa intercepta na etapa anterior.

Tabela 4.3 – Fator de interação em cada etapa dos ensaios

Ensaio	Etapa	$Q_{\text{mín}}$ (kN)	$Q_{\text{máx}}$ (kN)	$Q_{\text{média}}$ (kN)	$Q_{\text{cíclica}}$ (kN)	$Q_{\text{interação}}$ (kN)	$Q_{\text{interação}}/Q_{(\text{máx-mín})}$
A	A-01	18,68	30,51	24,60	5,91	-	-
	A-02	28,42	50,57	39,50	11,08	2,09	0,09
	A-03	38,60	69,87	54,24	15,64	11,97	0,38
	A-04	49,19	89,91	69,55	20,36	20,68	0,51
B	B-01	9,77	31,04	20,40	10,64	-	-
	B-02	28,57	52,60	40,58	12,02	2,47	0,10
	B-03	47,98	71,05	59,52	11,53	4,62	0,20
	B-04	68,08	91,55	79,82	11,74	2,97	0,13

No Ensaio A, a carga de interação e o fator de interação crescem a cada etapa do ensaio. Já no Ensaio B, se verifica uma tendência de constância e baixos valores de carga de interação e fator de interação. Isso pode ser atribuído ao fato de o Ensaio B possuir incrementos de carregamento constantes entre as etapas, diferentemente do ocorre no Ensaio A, onde esses incrementos aumentam a cada etapa.

4.2.1. Resultados das seções instrumentadas

Foram instrumentadas três seções (S_1 , S_2 e S_3) para medição de esforço normal. Os resultados gráficos da instrumentação em cada ensaio são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4. Além disso, são apresentados na mesma figura os dados de carga e deslocamento medidos no topo da estaca.

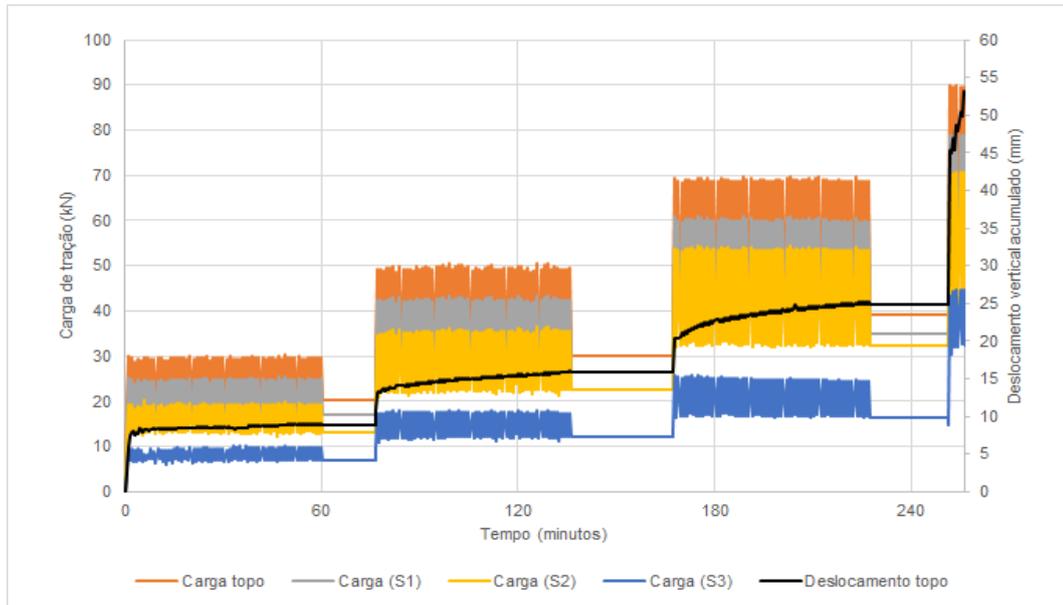


Figura 4.3 – Resultado da instrumentação no Ensaio A

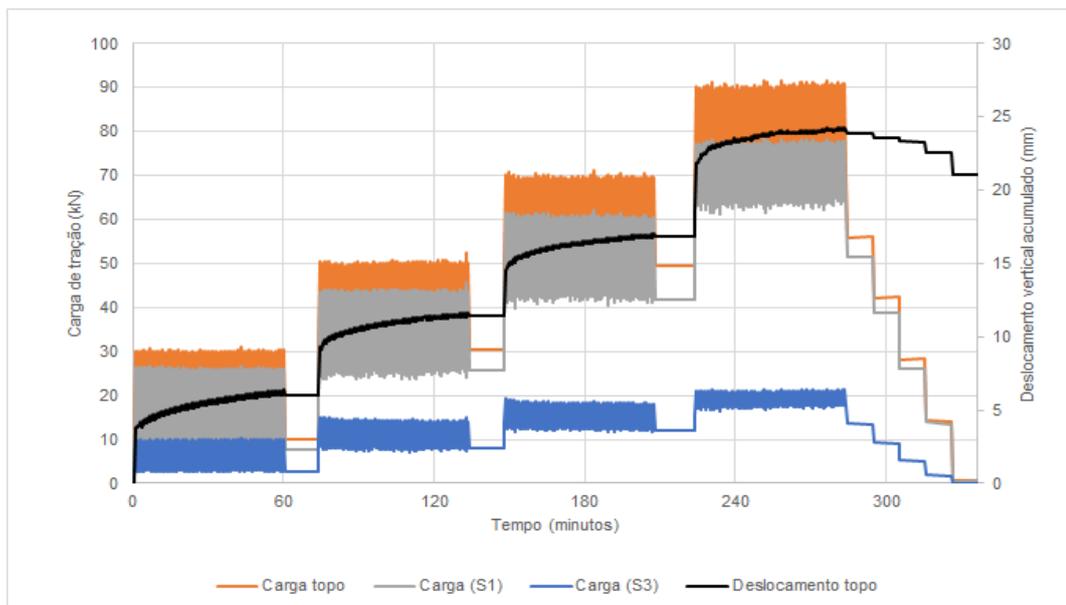


Figura 4.4 – Resultado da instrumentação no Ensaio B

No Ensaio A foi constatada a ruptura do sistema solo-estaca na última etapa do ensaio, não acontecendo o mesmo no Ensaio B. Também que no Ensaio B, devido um problema no sensor durante a instalação da estaca, não foram obtidos dados de instrumentação na seção S₂.

Ademais, foram determinados os parâmetros de interação para cada seção instrumentada, sendo os valores apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Fator de interação em cada seção do Ensaio A

Seção	Etapa	Q _{mín} (kN)	Q _{máx} (kN)	Q _{média} (kN)	Q _{cíclica} (kN)	Q _{interação} (kN)	Q _{interação} /Q _(máx-mín)
S ₁	A-01	15,76	25,63	20,69	4,93	-	-
	A-02	24,73	43,49	34,11	9,38	0,90	0,05
	A-03	33,74	60,93	47,33	13,59	9,75	0,36
	A-04	41,46	78,87	60,17	18,70	19,46	0,52
S ₂	A-01	12,13	20,13	16,13	4,00	-	-
	A-02	19,18	36,50	27,84	8,66	0,95	0,05
	A-03	28,61	54,48	41,54	12,93	7,89	0,31
	A-04	34,16	70,85	52,51	18,34	20,32	0,55
S ₃	A-01	5,69	10,17	7,93	2,24	-	-
	A-02	9,80	18,01	13,90	4,11	0,38	0,05
	A-03	14,24	25,73	19,99	5,75	3,77	0,33
	A-04	14,66	44,76	29,71	15,05	11,08	0,37

Tabela 4.5 – Fator de interação em cada seção do Ensaio B

Seção	Etapa	Q _{mín} (kN)	Q _{máx} (kN)	Q _{média} (kN)	Q _{cíclica} (kN)	Q _{interação} (kN)	Q _{interação} /Q _(máx-mín)
S ₁	B-01	7,26	26,72	16,99	9,73	-	-
	B-02	23,56	45,83	34,70	11,14	3,16	0,14
	B-03	39,67	62,10	50,88	11,21	6,16	0,27
	B-04	57,85	78,44	68,14	10,30	4,25	0,21
S ₃	B-01	2,59	10,28	6,43	3,84	-	-
	B-02	7,15	14,98	11,07	3,92	3,13	0,40
	B-03	11,71	19,36	15,53	3,82	3,28	0,43
	B-04	15,63	21,46	18,55	2,92	3,73	0,64

4.2.2. Transferência de carga

Com a instrumentação, foi possível analisar a distribuição das cargas ao longo da estaca e, além disso, mensurar as contribuições de resistências provenientes do fuste e das hélices. Os diagramas de transferência de carga são apresentados na Figura 4.5 e 4.6.

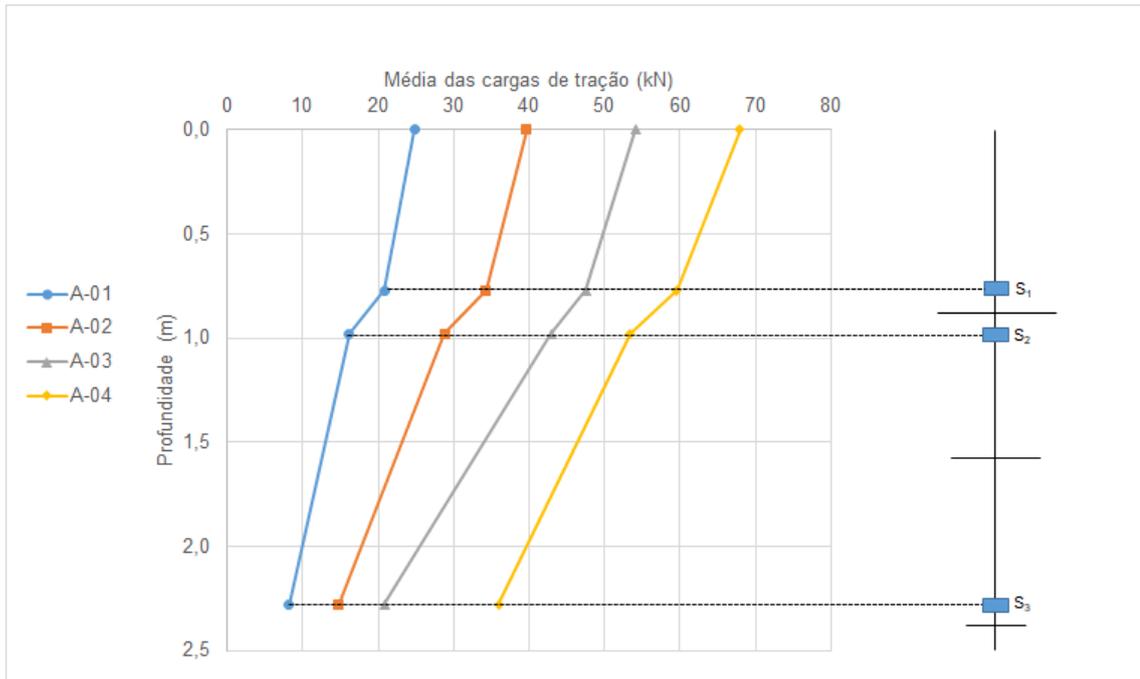


Figura 4.5 – Transferência de cargas no Ensaio A

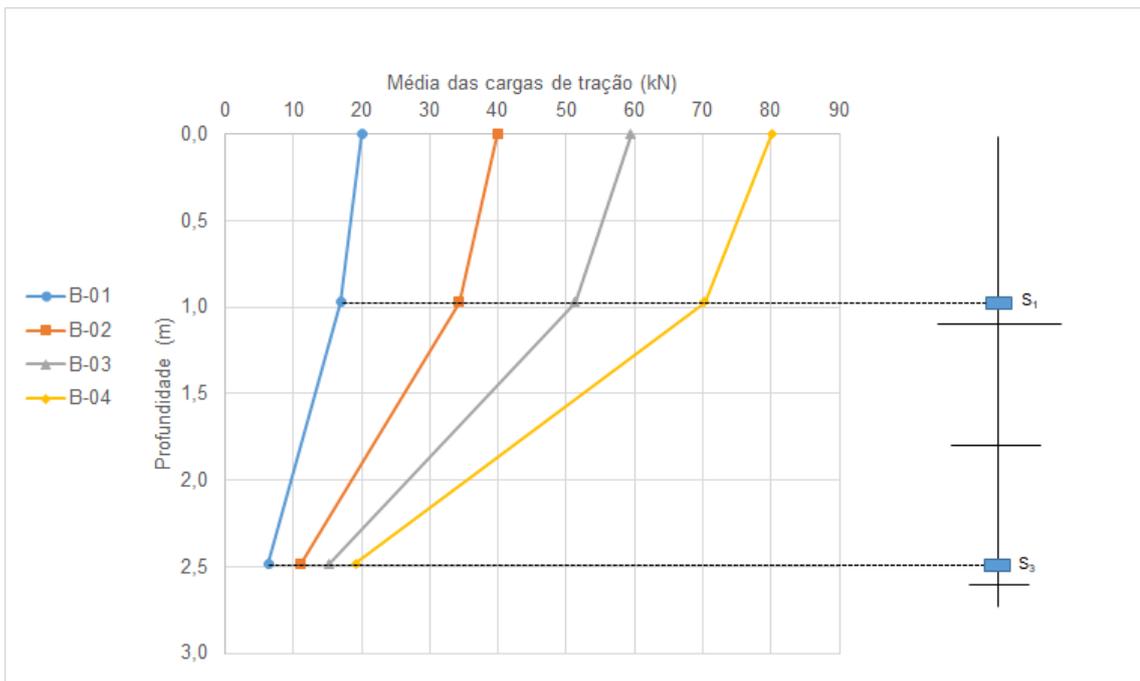


Figura 4.6 – Transferência de cargas no Ensaio B

Com os dados, se observa que, obviamente, as cargas diminuem com o aumento da profundidade da instrumentação. A Tabela 4.6 mostra a razão entre as cargas nas seções instrumentadas e a carga aplicada no topo da estaca (Q), em valores médios. Se comparado ao

Ensaio A, os valores do Ensaio B são, em geral, menores devido a profundidade de instalação da estaca ser maior em cada seção.

Tabela 4.6 – Razão entre as cargas nas seções instrumentadas e no topo da estaca

Etapa	Ensaio A			Ensaio B	
	S ₁ /Q	S ₂ /Q	S ₃ /Q	S ₁ /Q	S ₃ /Q
01	83,92%	65,07%	33,08%	84,51%	31,49%
02	86,52%	72,62%	37,15%	85,77%	27,74%
03	87,92%	79,45%	38,47%	86,19%	25,74%
04	87,67%	78,57%	52,94%	87,65%	23,88%

Partindo agora para a contribuição de resistência provenientes do fuste e das hélices, os valores médios obtidos nos Ensaio A e B são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente.

Tabela 4.7 – Parcelas de contribuição de resistências médias no Ensaio A

Ensaio	Etapa	Total ¹ (kN)	F ₁ ² (kN)	H ₁ ³ (kN)	H ₂ +F ₂ ⁴ (kN)	H ₃ ⁶ (kN)
A	A-01	25	4	5	8	8
	A-02	40	5	6	14	15
	A-03	54	7	5	22	21
	A-04	68	8	6	17	36

Tabela 4.8 – Parcelas de contribuição de resistências médias no Ensaio B

Ensaio	Etapa	Total ¹ (kN)	F ₁ ² (kN)	H ₁ +H ₂ +F ₃ ⁵ (kN)	H ₃ ⁶ (kN)
B	B-01	20	3	11	6
	B-02	40	6	23	11
	B-03	59	8	36	15
	B-04	80	10	51	19

Nota:

¹Carga total aplicada na cabeça da estaca, medida pela célula de carga.

²Carga resistida por atrito lateral no fuste acima da hélice de topo, dada pela subtração da carga total pela carga na seção S₁.

³Carga correspondente a hélice H₁. Determinada subtraindo-se a carga na seção S₁ pela carga na seção S₂ (Somente para o Ensaio A).

⁴Carga resistida pela hélice H₂ mais o fuste compreendido entre as seções S₂ e S₃. Determinada pela subtração da carga na seção S₂ pela carga da seção S₃ (Somente para o Ensaio A).

⁵Carga resistida pela hélice H₁, H₂ e o fuste compreendido entre as seções S₁ e S₃. Determinada pela subtração da carga na seção S₁ e S₃ (Somente para o Ensaio B).

⁶Carga na hélice de ponta, H₃, obtida na seção S₃.

Com base nos resultados, observa-se que no Ensaio A a contribuição de resistência do fuste superior (F_1) foi de 16% da carga total na primeira etapa do ensaio, sendo esse valor diminuído com o passar das etapas. Devido melhoria das propriedades do solo com o aumento dos deslocamentos, a contribuição proveniente da hélice inferior (H_3) tem o maior crescimento com o passar das etapas. Isso leva a uma contribuição de resistência proveniente das hélices de quase 90% da carga total.

No Ensaio B, se observa uma contribuição de resistência do fuste superior (F_1) de 15% da carga total na primeira etapa do ensaio, sendo esse valor também reduzido com o passar das etapas. A contribuição de resistência da hélice inferior (H_3) também apresenta crescimento considerável com o passar das etapas, porém em menor proporção. Esse fato pode ser atribuído a forma de carregamento distinto que foi empregado nos ensaios, onde no Ensaio B foram utilizados incrementos de carga constantes e menores que, por sua vez, podem ter provocado uma menor densificação no solo e o melhorado em menor magnitude. Além disso, foi visto que a contribuição de resistência oriunda das hélices também chegou próximo de 90% da carga total.

Em suma, verificou-se que as hélices são responsáveis pela maior parcela de carga resistida, o que já era esperado, pelo fato das estacas, como já citado anteriormente, apresentarem condição de ancoragem rasa. Vale salientar que as hélices do meio (H_2) e ponta (H_3) são responsáveis pela maior parcela de contribuição de resistências, representando cerca de 80% da carga resistida. Isso é justificado pelo fato de o solo circundante a essas hélices sofrer menor perturbação se comparado com o solo próximo a hélice de topo (H_1) e, ademais, devido ao solo apresentar valor do N_{SPT} crescente com o aumento da profundidade (vide Figura 3.4).

4.2.3. Deslocamento acumulado

O deslocamento acumulado ou permanente ($U_{acumulado}$) é a diferença entre a leitura do deslocamento após um ciclo de carga e a leitura do deslocamento antes do primeiro ciclo ser aplicado. Os deslocamentos acumulados nos Ensaio A e B são mostrados nas Figuras 4.7 e 4.9, respectivamente. Como os valores obtidos na etapa A-04 foram muito maiores que os demais, sendo isso resultado da ruptura do sistema solo-estaca no ensaio, para facilitar a análise e compreensão foi elaborada a Figura 4.8.

Com os resultados se verificou que os deslocamentos acumulados tenderam a estabilizar nos primeiros 10 ciclos em todas as etapas. Para as análises, a ruptura cíclica foi definida como

um deslocamento permanente igual a 10% do diâmetro médio da hélice. Este critério é semelhante ao relatado por Tsuha *et al.* (2012b). O passo A-04 atingiu a condição de ruptura antes de 10 ciclos de carga e descarga.

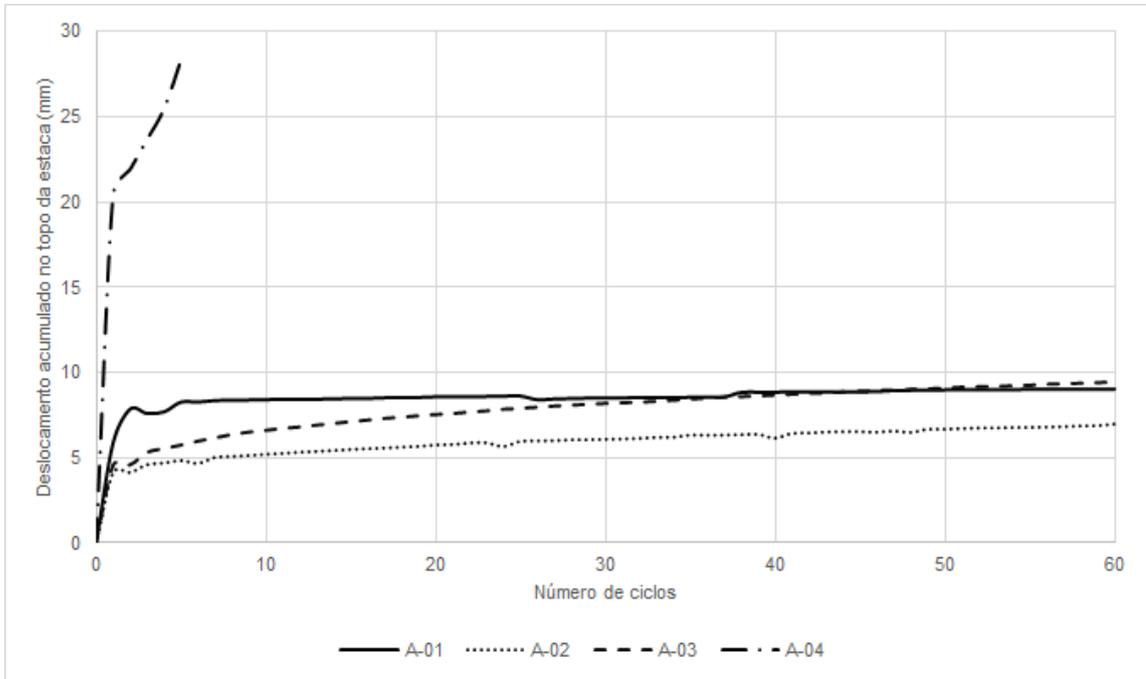


Figura 4.7 – Deslocamentos acumulados do Ensaio A

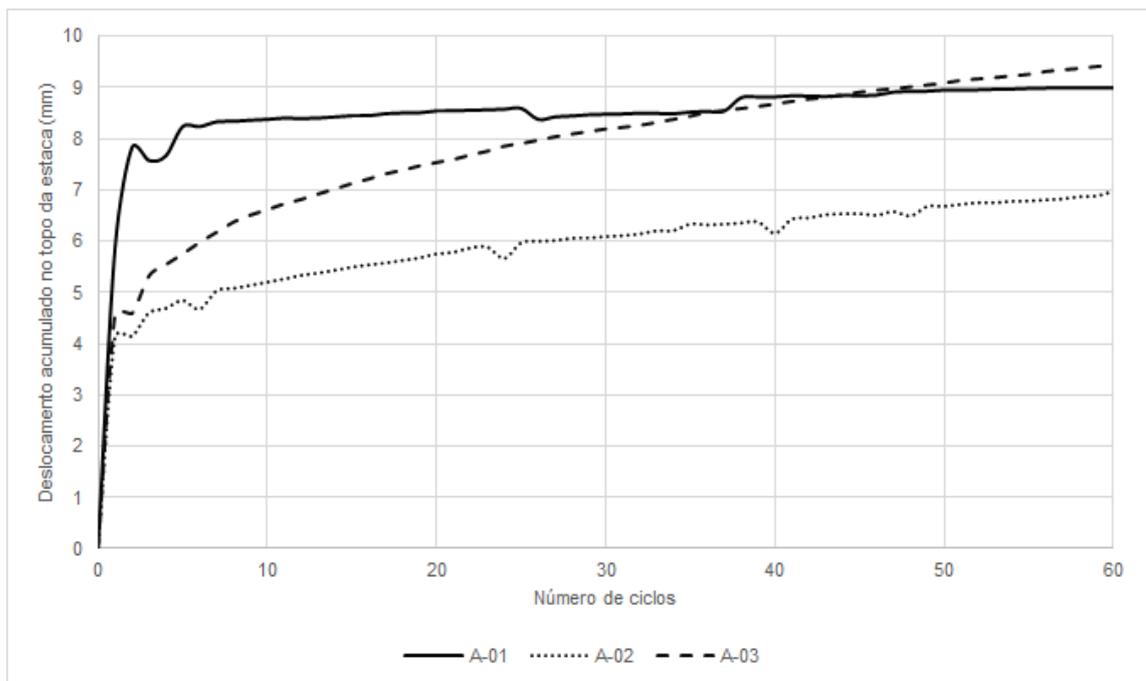


Figura 4.8 – Deslocamentos acumulados do Ensaio A sem a etapa A-04

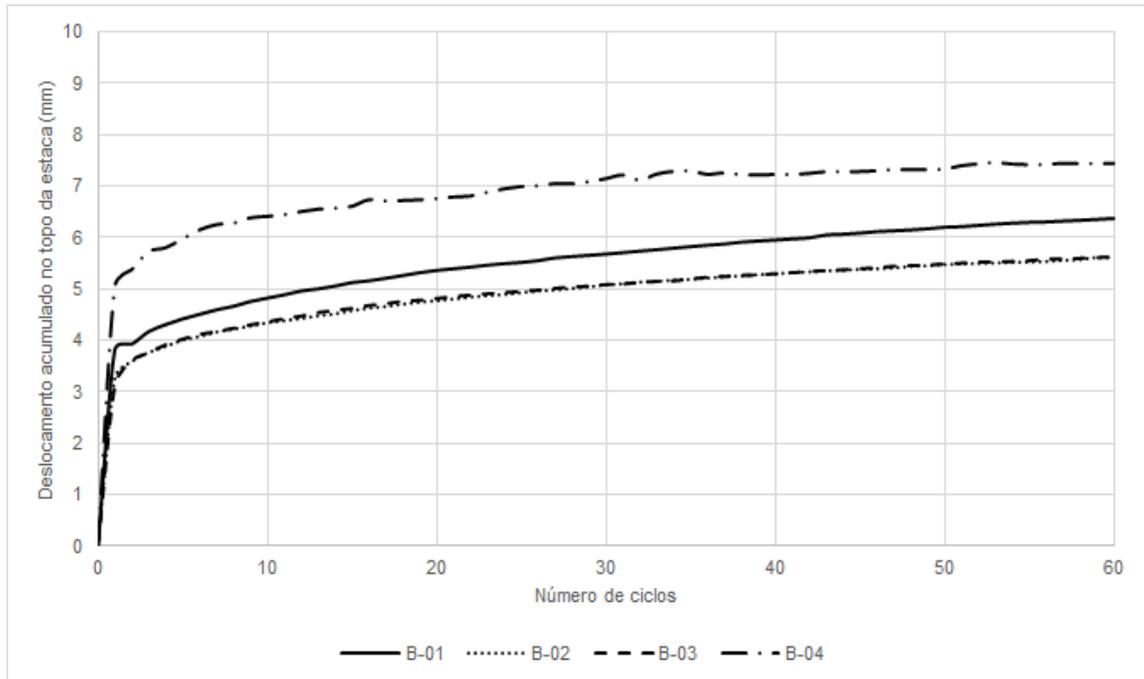


Figura 4.9 – Deslocamentos acumulados do Ensaio B

No Ensaio A, onde as cargas mínimas e máximas foram aumentadas com incrementos crescentes, é observado na etapa A-01 que os deslocamentos acumulados iniciais foram maiores em comparação as demais etapas. Isto pode ser atribuído a possíveis folgas no eixo da estaca ou à condição fofa do solo acima das placas helicoidais causadas por perturbação durante a instalação, isto é, a presença de vazios acima das placas causada pela rotação da estaca no local durante a instalação. Nas demais etapas, devido a densificação do solo após os primeiros ciclos de carregamento e, conseqüentemente, o aumento na rigidez, se verifica deslocamentos acumulados menores. A exceção está na etapa A-03 que próximo aos 50 ciclos de carga e descarga os deslocamentos tenderam a evoluir, podendo isso ser atribuído a iminência de ruptura do sistema solo-estaca. Devido ao emprego de incrementos de cargas crescentes, a interação entre as etapas foi maior que os valores encontrados no Ensaio B.

No Ensaio B, os deslocamentos acumulados foram menores, podendo essa mudança ser imputada aos incrementos constantes e menores de carregamento que foram empregados nesse ensaio que, por sua vez, podem ter gerado uma menor densificação e maior deslocação do solo circunvizinho da estaca. A grande proximidade entre as curvas das etapas B-02 e B-03 se deu possivelmente pelo fator de interação de 20% entre as etapas, que pode ter elevado a rigidez do solo e reduzido os deslocamentos correspondentes.

4.2.4. Taxa de acumulação de deslocamento e diagrama de interação cíclica

A taxa de acumulação de deslocamento é a diferença entre a leitura do deslocamento antes e depois de um ciclo de carga. Com base nos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12, observa-se que os deslocamentos acumulados iniciais cresceram consideravelmente, porém após os 10 ciclos iniciais tenderam a estabilizar. Para a determinação da taxa de acumulação média de deslocamento ($V_{\text{médio}}$) e do número de ciclos antes da ruptura (N_{ruptura}), nas etapas em que a ruptura não foi observada, foram utilizadas as equações expressas pelas Equação 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$V_{\text{médio}} = \frac{U_{\text{acumulado}, N} - U_{\text{acumulado}, N=10}}{N - 10}$$

Equação 4.1

$$N_{\text{ruptura}} = \left(\frac{10\% D_{\text{médio}} - U_{\text{acumulado}, N=10}}{V_{\text{médio}}} \right) + 10$$

Equação 4.2

Onde:

- $V_{\text{médio}}$: Taxa de acumulação média de deslocamento;
- N_{ruptura} : Número de ciclos antes da ruptura;
- $U_{\text{acumulado}, N}$: Deslocamento acumulado após o último ciclo;
- $U_{\text{acumulado}, N=10}$: Deslocamento acumulado após o 10º ciclo;
- $N - 10$: Número de ciclos entre o 10º e o último ciclo;
- $D_{\text{médio}}$: Diâmetro médio das hélices.

Os valores da taxa de acumulação média de deslocamento ($V_{\text{médio}}$), o número de ciclos antes da ruptura (N_{ruptura}) e a classificação da estabilidade em cada etapa dos ensaios são apresentados na Tabela 4.9. O valor adotado para Q_{total} foi de 92 kN, sendo esse obtido no trabalho de Queiroz (2018).

Tabela 4.9 – $V_{\text{médio}}$, N_{ruptura} e classificação da estabilidade

Ensaio	Etapa	$Q_{\text{média}}/Q_{\text{total}}$	$Q_{\text{cíclica}}/Q_{\text{total}}$	$V_{\text{médio}}$ (mm/ciclo)	N_{ruptura}	Classificação
A	A-01	0,27	0,06	$12,4 \times 10^{-3}$	1761	Estável
	A-02	0,43	0,12	$35,6 \times 10^{-3}$	707	Metaestável
	A-03	0,59	0,17	$56,4 \times 10^{-3}$	425	Metaestável
	A-04	0,76	0,22	2140×10^{-3}	6	Instável
B	B-01	0,22	0,12	$30,9 \times 10^{-3}$	825	Metaestável
	B-02	0,44	0,13	$25,2 \times 10^{-3}$	1029	Estável
	B-03	0,65	0,13	$25,2 \times 10^{-3}$	1030	Estável
	B-04	0,87	0,13	$20,5 \times 10^{-3}$	1161	Estável

No Ensaio A as taxas de acumulação média de deslocamento são crescentes, enquanto no Ensaio B essas taxas tendem a decrescer. Novamente, isso pode ser justificado pela configuração de carga aplicada em cada ensaio. Como mencionado anteriormente, no Ensaio A as cargas foram aplicadas em incrementos crescentes e no Ensaio B esses foram constantes, o que pode ter promovido menor perturbação no solo e, assim, melhor classificação de estabilidade com o passar das etapas.

No Ensaio A, vê-se que somente a etapa A-01 foi classificada com estável e com o aumento do deslocamento essa classificação tendeu a instabilidade, até a ruptura do sistema solo-estaca. No Ensaio B aconteceu o contrário, nos deslocamentos iniciais a classificação foi tida como metaestável e tendeu a se estabilizar com o passar das etapas.

Não foram encontradas baixas taxas de acumulação média de deslocamento. Nas etapas classificadas como estável, as taxas variaram de $12,4 \times 10^{-3}$ mm/ciclo até $25,2 \times 10^{-3}$ mm/ciclo. Nas etapas classificadas como metaestável, as taxas de acumulação foram de $30,9 \times 10^{-3}$ mm/ciclo até $56,4 \times 10^{-3}$ mm/ciclo. E na única etapa classificada como instável, que representou a ruptura do sistema solo-estaca, a taxa de acumulação média de deslocamento foi de 2140×10^{-3} mm/ciclo, sendo consideravelmente maior do que as demais. No Ensaio A, os deslocamentos acumulados aumentaram em taxas mais rápidas quando cargas médias aplicadas na estaca foram superiores a 40% da capacidade de carga de tração estática (Q_{total}). Isso ocorreu nas etapas A-02, A-03 e A-04. No Ensaio B, a taxa de crescimento dos deslocamentos acumulados foi mais equilibrada.

O número de ciclos antes da ruptura é dependente da carga média e da amplitude cíclica normalizadas pela capacidade de carga de tração estática. No Ensaio A os valores de $Q_{\text{média}}/Q_{\text{total}}$ e $Q_{\text{cíclica}}/Q_{\text{total}}$ foram aumentando a cada etapa e no Ensaio B, por sua vez, mesmo as cargas

cíclicas médias normalizadas apresentando valores crescentes, a amplitude cíclica normalizada se comportou de forma constante, o que promoveu classificação estável na maioria das etapas.

A Figura 4.10 mostra o diagrama de interação cíclica elaborado com base nos resultados dos Ensaio A e B que demarca as zonas de acordo com sua classe de estabilidade seguindo Tsuha *et al.* (2012b).

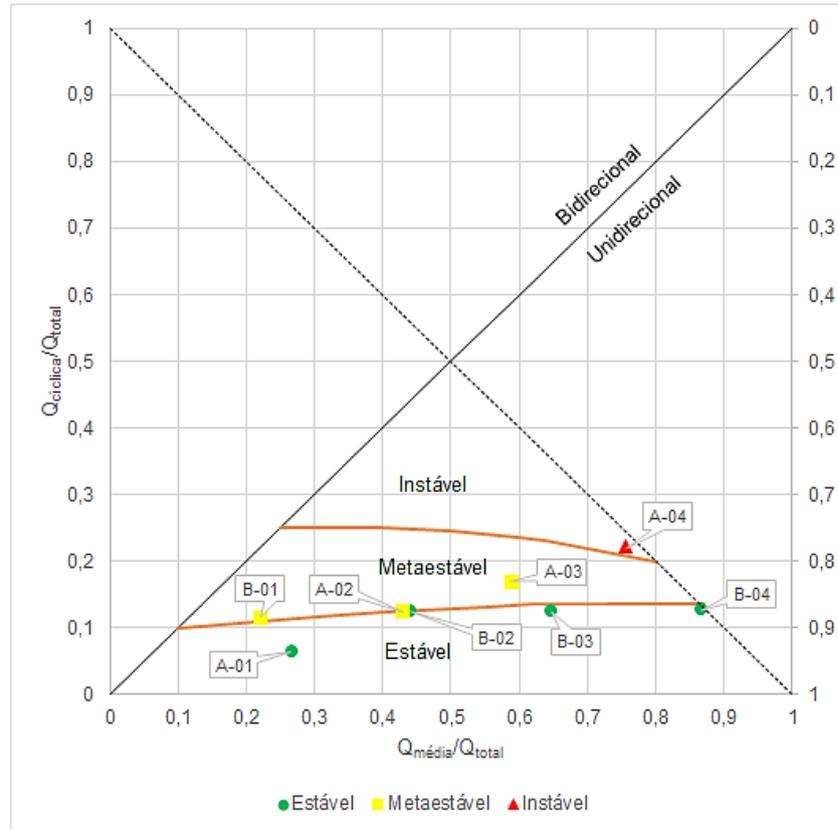


Figura 4.10 – Diagrama de interação cíclica com os resultados dos Ensaio A e B

4.2.5. Rigidez cíclica

Nessa etapa foram avaliados os parâmetros de rigidez cíclica no carregamento e no descarregamento utilizando os parâmetros de rigidez e deslocamento estabelecidos por Rimoy *et al.* (2013) ilustrados na Figura 4.11.

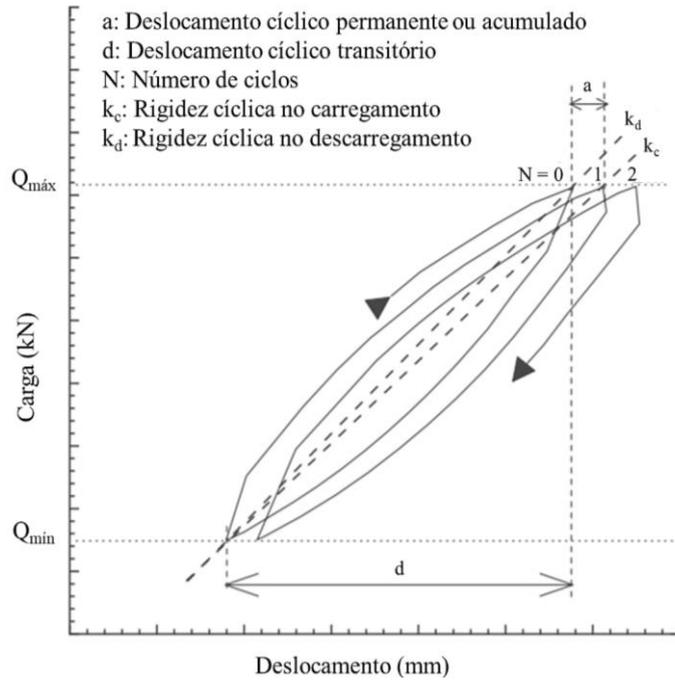


Figura 4.11 – Ilustração dos parâmetros de rigidez e deslocamento utilizados nas análises (RIMOY *et al.*, 2013)

4.2.5.1. Rigidez cíclica no carregamento

Inicialmente foi analisada a rigidez cíclica com os resultados obtidos no topo da estaca helicoidal, sendo esses as referências para as demais análises. A partir disso, os valores obtidos em cada seção instrumentadas foram normalizados para simplificar as comparações. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os valores de rigidez cíclica em cada ciclo dos Ensaio A e B, respectivamente.

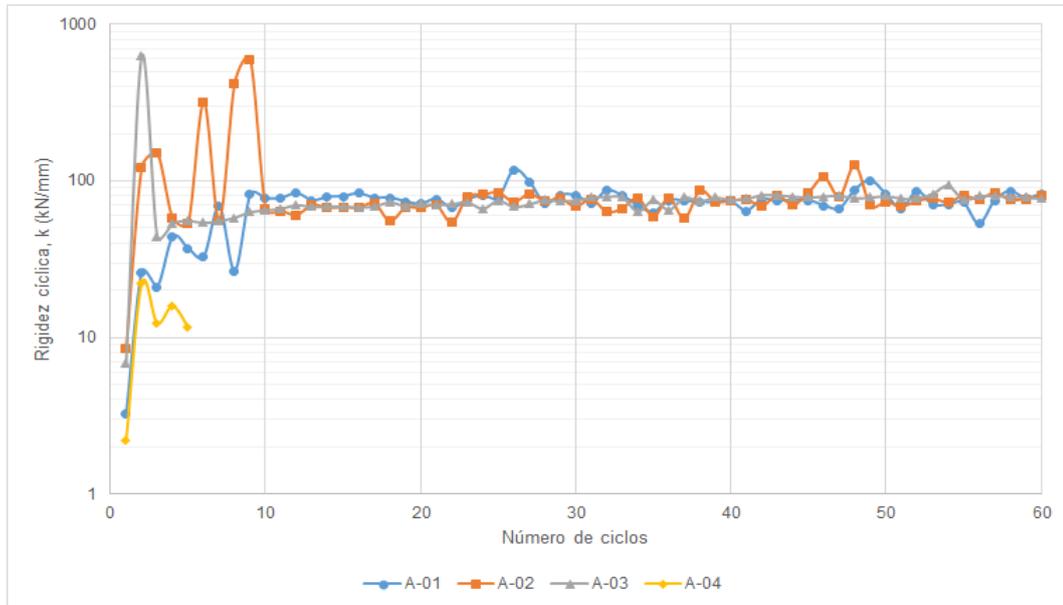


Figura 4.12 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio A: Carregamento)

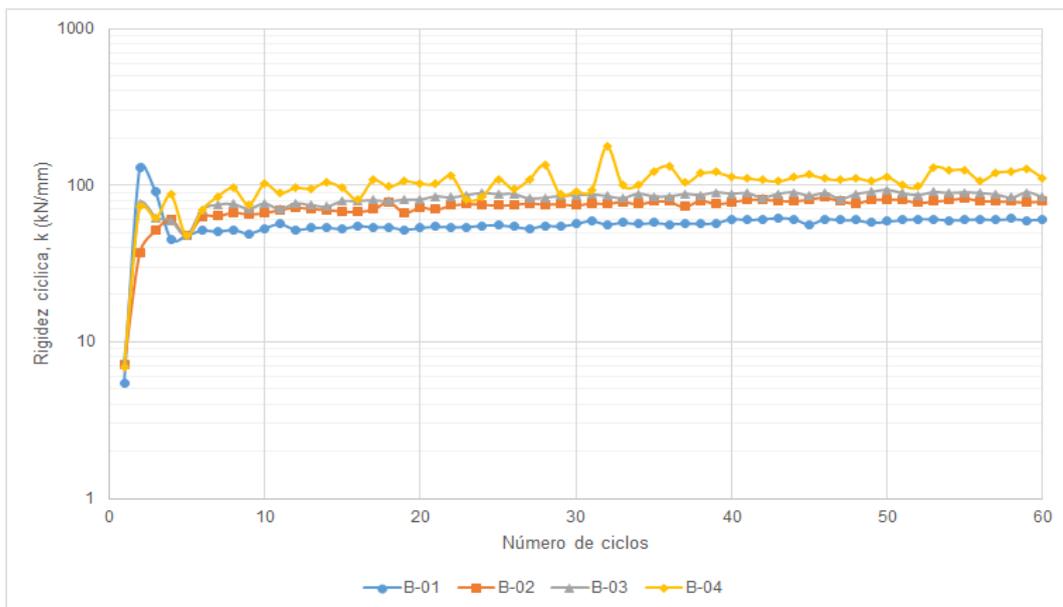


Figura 4.13 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio B: Carregamento)

Inicialmente, de porte dos dados obtidos no topo da estaca, se observa que a rigidez cíclica no Ensaio A tendeu a estabilizar após os primeiros 10 ciclos, com exceção da etapa A-04 onde os valores de rigidez foram muito inferiores aos demais devido a ruptura do sistema solo-estaca.

No Ensaio B se verifica um comportamento diferente. É notado um comportamento crescente e comportado entre as etapas do ensaio, sendo isso verificado devido à amplitude constante de carga aplicada do ensaio.

Em suma, a rigidez cíclica foi afetada pelo modo de como os incrementos de carregamentos foram imputados. No Ensaio A, à exceção de A-04, todos as demais etapas produziram rigidez residual semelhantes após de atingir o 10º ciclo, em torno de 75 kN/mm. No Ensaio B, por sua vez, a rigidez residual apresentou um orientado crescimento entre as etapas após o 10º ciclo, convergindo a valores próximos de 60, 80, 85 e 110 kN/mm para as etapas 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

Os valores de rigidez cíclica no carregamento foram normalizados pela rigidez mensurada no 1º ciclo de cada etapa ($k_c/k_{c, N=1}$). Os gráficos com os resultados obtidos para os Ensaio A e B são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15, respectivamente.

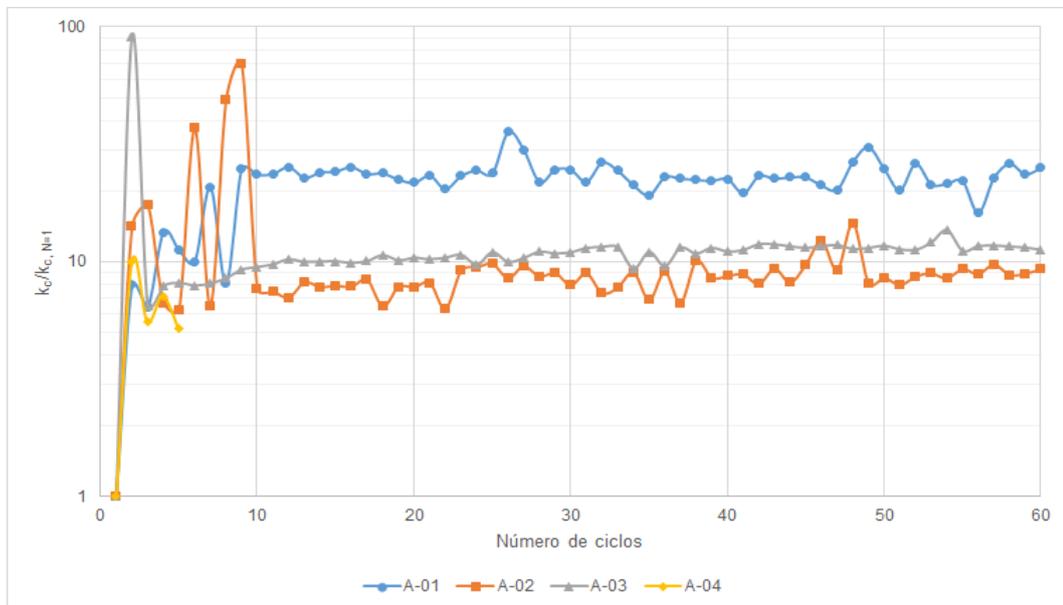


Figura 4.14 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de N=1 de cada etapa (Ensaio A: Carregamento)

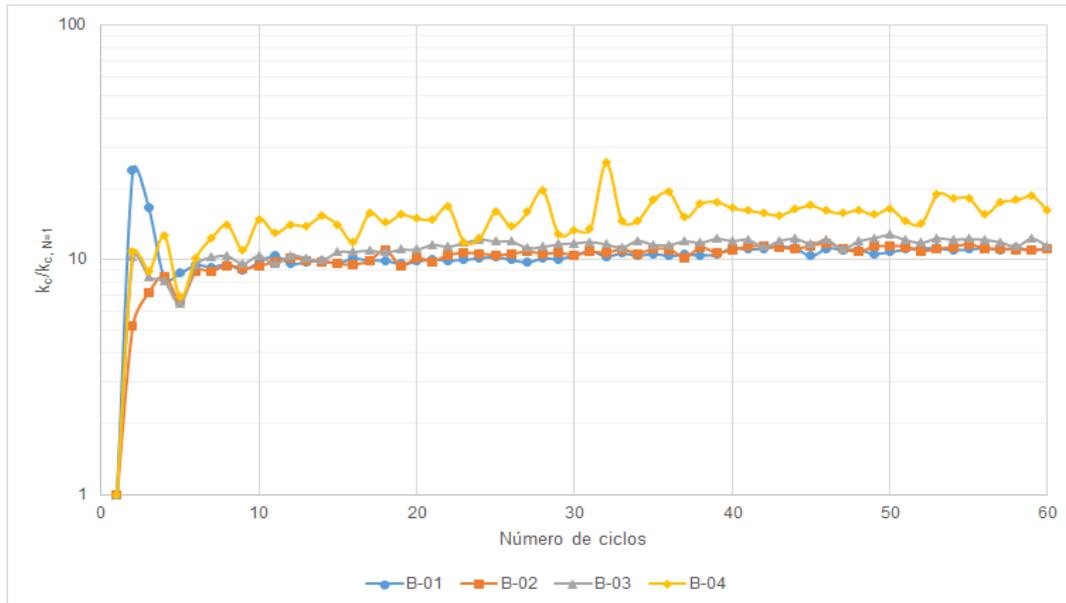


Figura 4.15 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de $N=1$ de cada etapa (Ensaio B: Carregamento)

Tanto no Ensaio A quanto no Ensaio B, os resultados mostram que a rigidez cíclica normalizada em termos do 1º ciclo de cada etapa aumenta e tende a se manter estável em valores próximos de 10 logo após o 10º ciclo. As exceções são as etapas A-01, onde essa tendência de estabilidade aumentou para valores próximos de 25 devido à baixa perturbação do solo nos deslocamentos iniciais, e B-04, onde essa tendência de estabilidade evoluiu para valores próximos de 15 devido ao aumento na densidade do solo. No Ensaio B essa tendência de estabilidade é mais nítida. A análise nas seções instrumentadas também apresentou configuração semelhante à descrita.

Finalmente, foram analisados os dados obtidos de rigidez cíclica em todas as seções instrumentadas. As Figuras 4.16, 4.17, e 4.18 explicitam como se deu a variação de rigidez cíclica nas seções S_1 , S_2 e S_3 do Ensaio A, e as Figuras 4.19 e 4.20 nas seções S_1 e S_3 do Ensaio B.

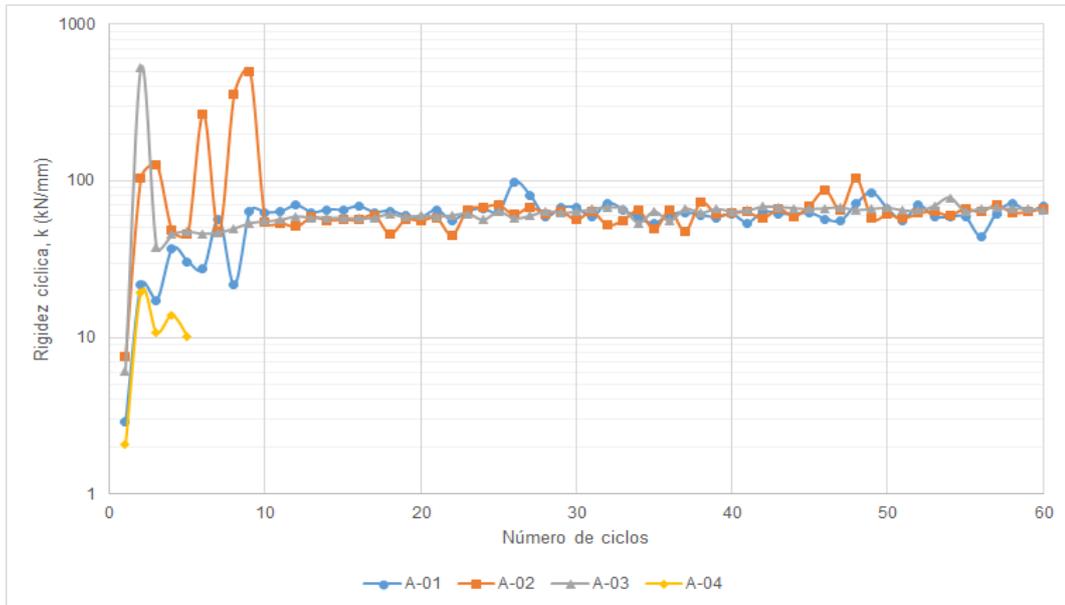


Figura 4.16 – Rigidez cíclica na seção S₁ (Ensaio A: Carregamento)

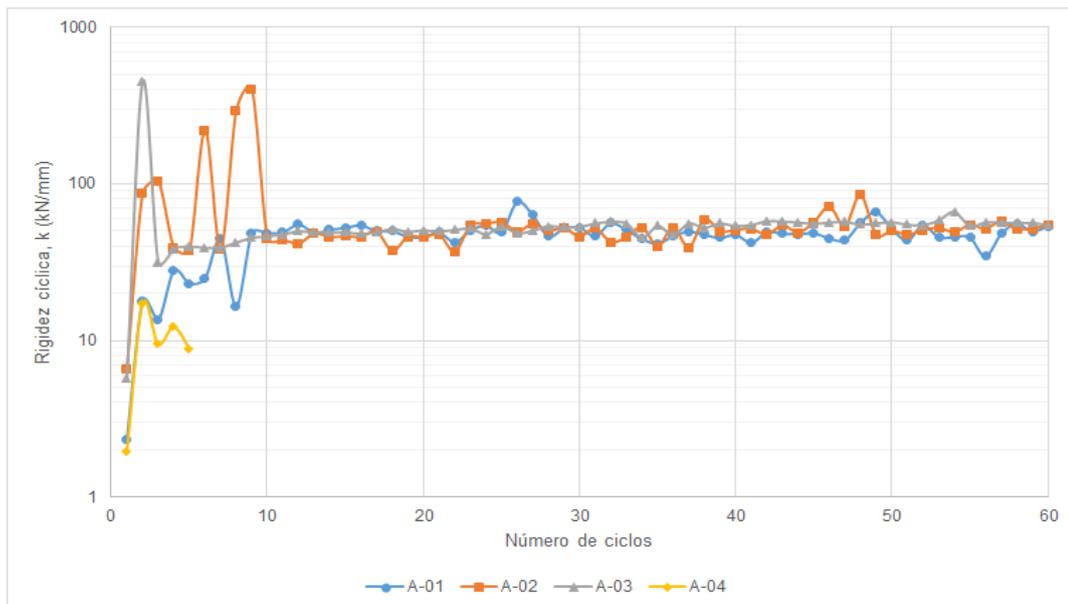


Figura 4.17 – Rigidez cíclica na seção S₂ (Ensaio A: Carregamento)

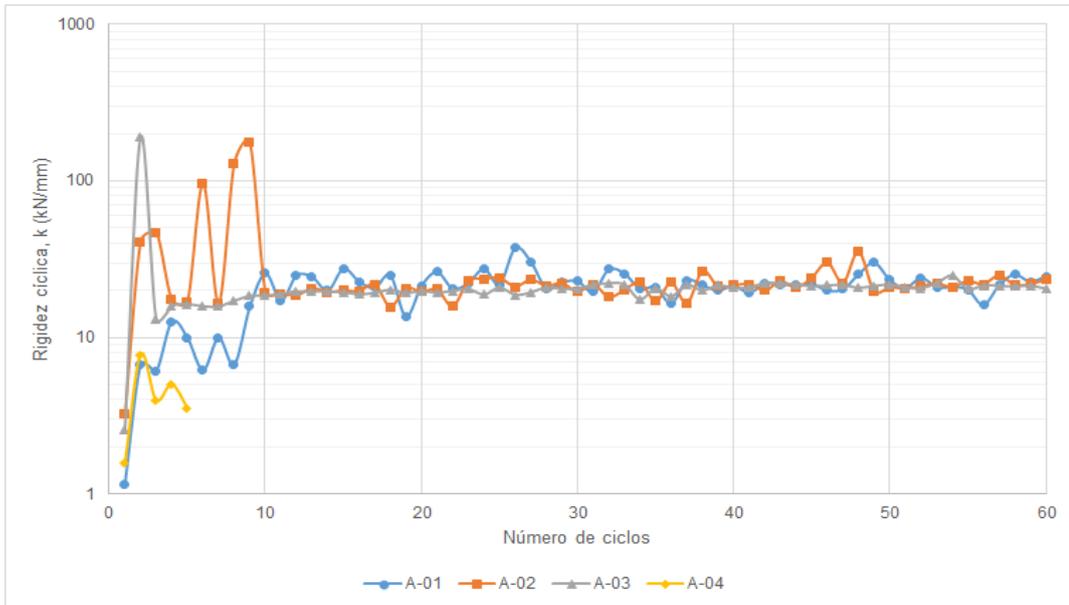


Figura 4.18 – Rigidez cíclica na seção S₃ (Ensaio A: Carregamento)

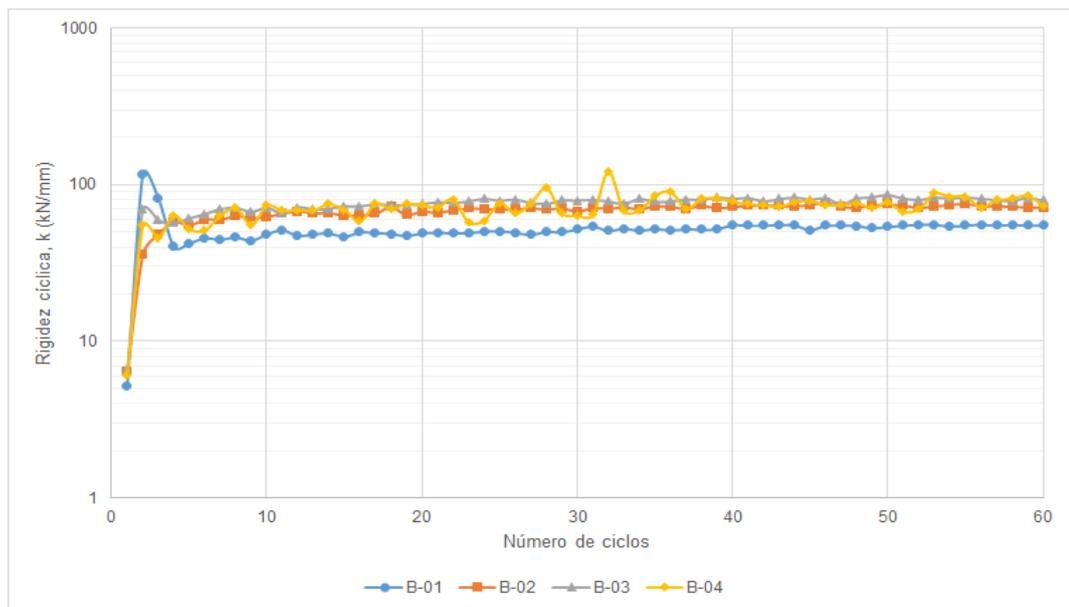
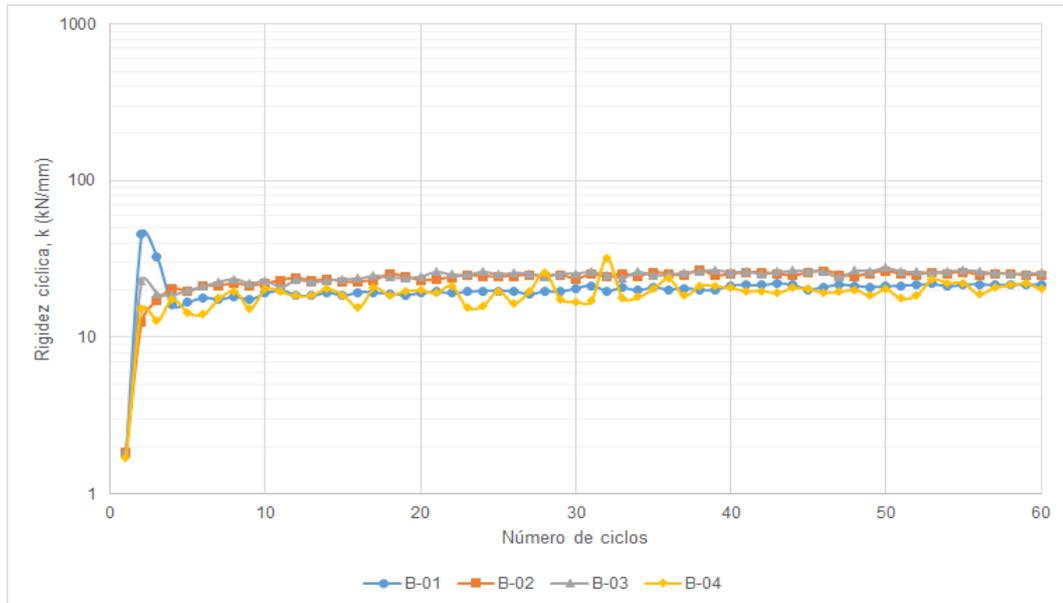


Figura 4.19 – Rigidez cíclica na seção S₁ (Ensaio B: Carregamento)

Figura 4.20 – Rigidez cíclica na seção S₃ (Ensaio B: Carregamento)

No Ensaio A, à exceção da etapa A-04, a rigidez cíclica residual após o 10º ciclo convergiu para valores próximos de 60, 50 e 20 kN/mm nas seções S₁, S₂, e S₃, respectivamente. No Ensaio B a rigidez residual apresentou crescimento entre as etapas após o 10º ciclo, porém, devido ao aumento nos fatores de interação, como mostrado na Tabela 4.5, essa evolução não se apresentou de forma organizada, tendendo a valores próximos de 50, 70, 80 e 85 kN/mm na seção S₁ e de 20, 25, 25, 20 kN/mm na seção S₃ para as etapas 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

Para facilitar o entendimento, as Figuras 4.21 e 4.22 apresentam a relação entre a rigidez cíclica residual (estável) e a profundidade da seção instrumentada para os Ensaio A e B, respectivamente.

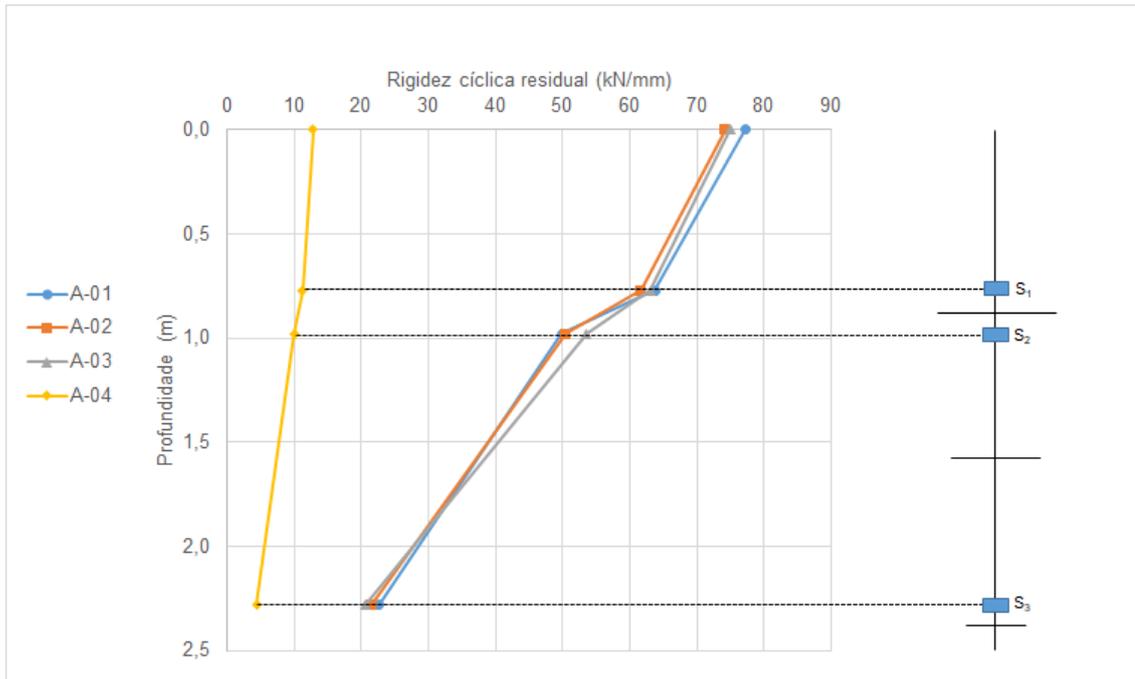


Figura 4.21 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio A: Carregamento)

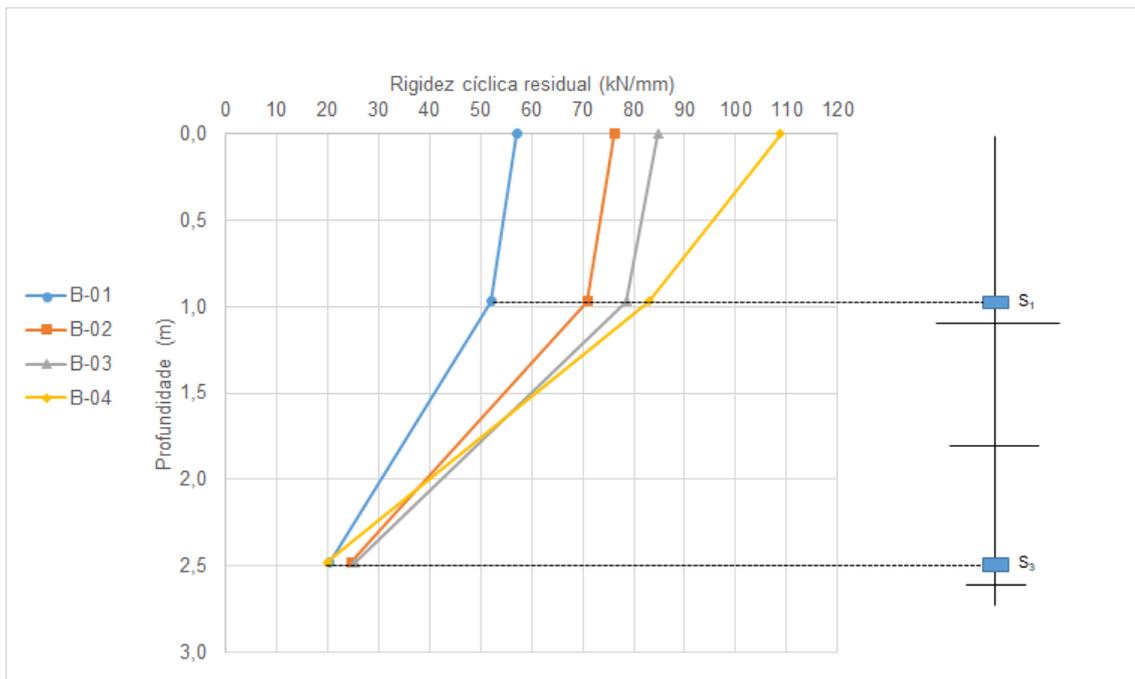


Figura 4.22 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio B: Carregamento)

Analisando as Figuras 4.21 e 4.22, se observa a rigidez cíclica residual diminui com o aumento na profundidade da seção instrumentada. Isso prova que durante a instalação das hélices o solo sofre diminuição na densidade e o sistema perde, notavelmente, rigidez. Além

disso, se nota a influência dos fatores de interação na rigidez do sistema. Comparando os resultados, no Ensaio A, como os fatores de interação, que eram altos, se mantiveram elevados com o aumento na profundidade (vide Tabela 4.4), a rigidez tendeu a convergir para o mesmo valor em todas as seções e no Ensaio B, como os fatores de interação, que eram inicialmente menores, evoluíram com a profundidade (vide Tabela 4.5), a rigidez apresentou crescimento, contudo o aumento foi atenuado com a profundidade.

4.2.5.2. Rigidez cíclica no descarregamento

Além dos dados de rigidez cíclica no carregamento, foram também obtidos dados de rigidez cíclica no descarregamento. Da mesma forma, inicialmente foi analisada a rigidez cíclica com os resultados obtidos no topo da estaca helicoidal, servindo esses de referências para as demais análises. A partir disso, os valores obtidos em cada seção instrumentadas foram normalizados para facilitar as comparações. As Figuras 4.23 e 4.24 mostram os valores de rigidez cíclica em cada ciclo dos Ensaio A e B, respectivamente.

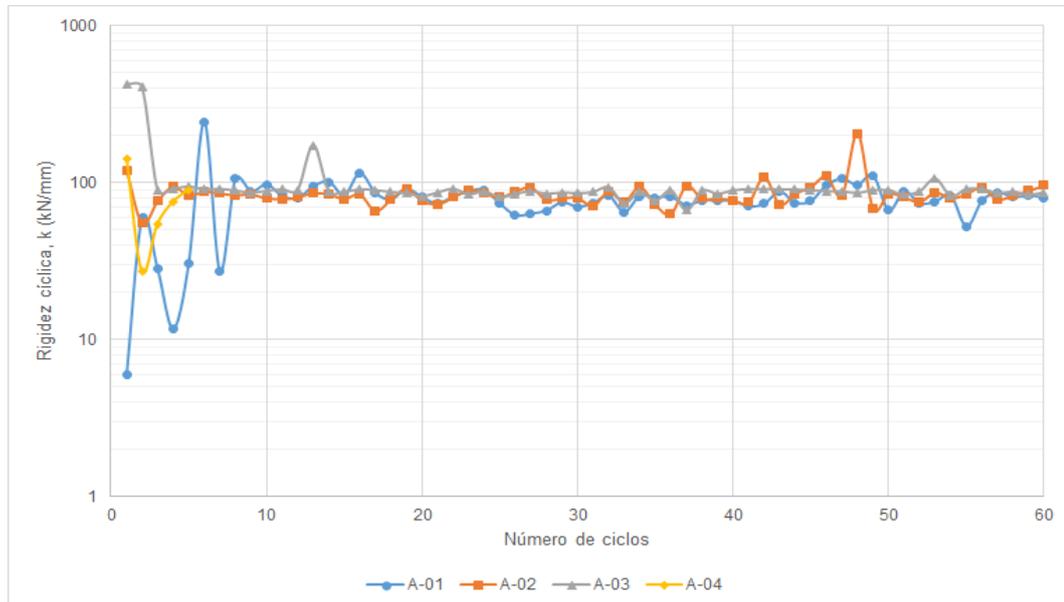


Figura 4.23 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio A: Descarregamento)

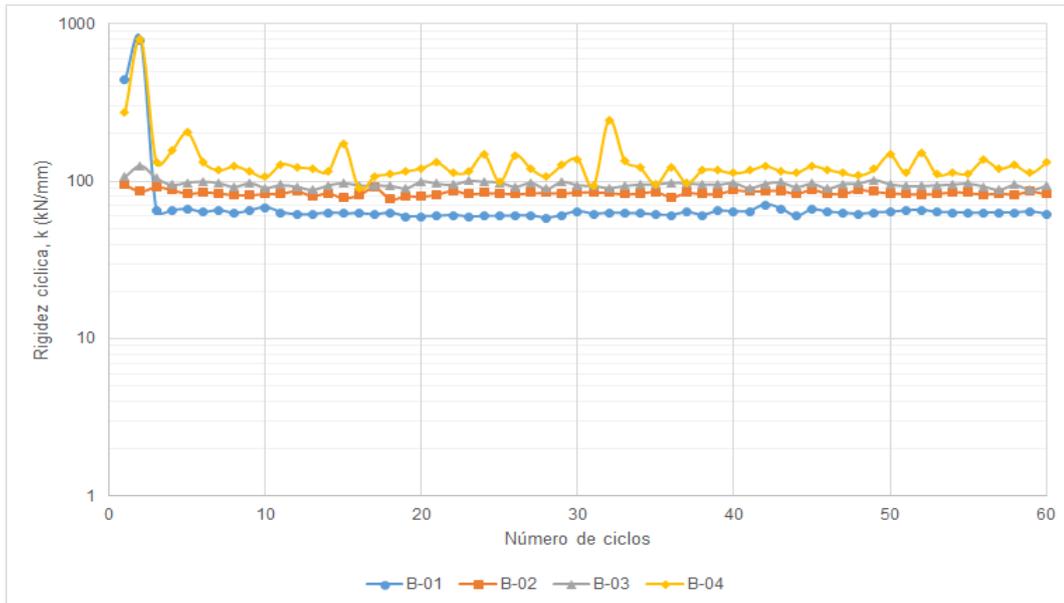


Figura 4.24 – Rigidez cíclica no topo da estaca (Ensaio B: Descarregamento)

No Ensaio A, se observa que a rigidez cíclica tendeu a estabilizar após os primeiros 10 ciclos. Na etapa A-04, devido a ruptura do sistema solo-estaca, se nota inicialmente uma diminuição da rigidez, porém posteriormente tende novamente a aumentar.

No Ensaio B a rigidez inicialmente é bastante elevada, mas tende a estabilizar também após o 10º ciclo. Assim como no carregamento, é observado um comportamento crescente e organizado entre as etapas do ensaio, sendo isso verificado devido à amplitude constante de carga aplicada do ensaio.

Em síntese, a rigidez cíclica, assim como no carregamento, foi afetada pela forma de como os incrementos de carregamentos foram colocados. No Ensaio A, à exceção de A-04, todos as demais etapas produziram rigidez residual semelhantes após de atingir o 10º ciclo, em torno de 85 kN/mm. No Ensaio B, por sua vez, a rigidez residual apresentou um orientado crescimento entre as etapas após o 10º ciclo, convergindo a valores próximos de 60, 85, 95 e 120 kN/mm para as etapas 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

Os valores de rigidez cíclica no descarregamento foram normalizados pela rigidez mensurada no 1º ciclo de cada etapa ($k_d/k_{d, N=1}$). Os gráficos com os resultados obtidos para os Ensaio A e B são apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26, respectivamente.

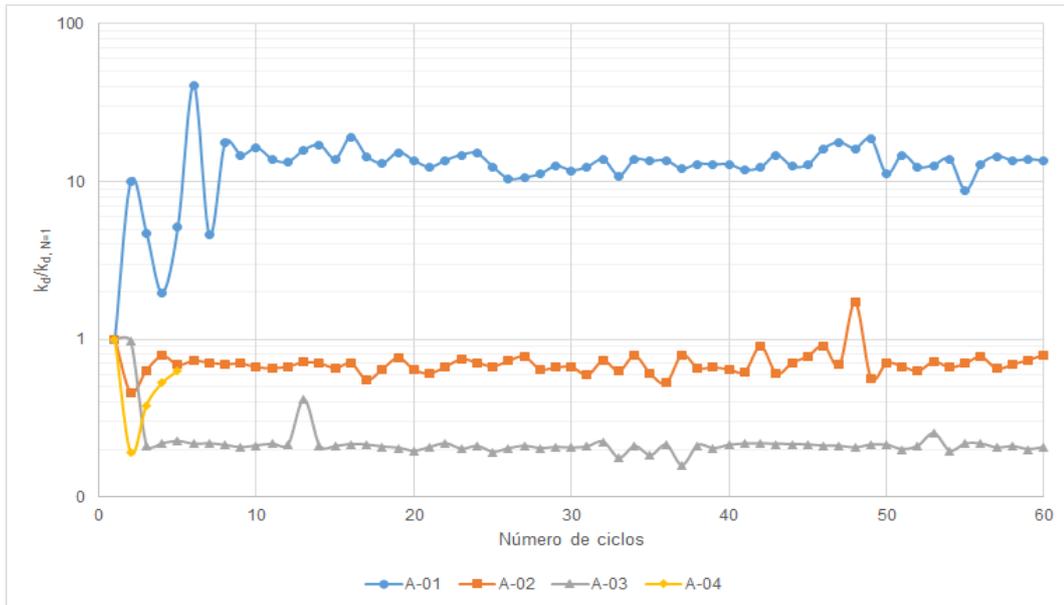


Figura 4.25 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de N=1 de cada etapa (Ensaio A: Descarregamento)

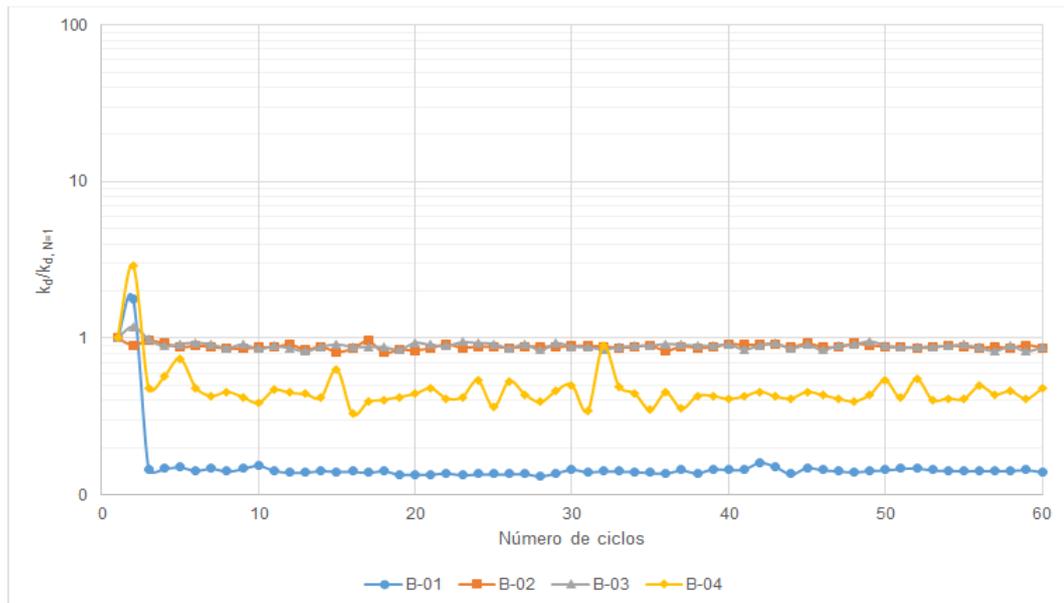


Figura 4.26 – Rigidez cíclica no topo da estaca normalizada em termos de N=1 de cada etapa (Ensaio B: Descarregamento)

Ao contrário do que ocorreu no carregamento, no descarregamento, no Ensaio A, a rigidez cíclica normalizada em termos do 1º ciclo de cada etapa mostrou uma instabilidade consideravelmente elevada, com valores muito discrepantes entre as etapas. Entretanto, mesmo com essas variações, se nota, também, que logo após o 10º ciclo os resultados tenderam a estabilizar. Os maiores valores, próximos de 15, foram obtidos na etapa A-01 e nas demais etapas os valores ficaram, em geral, abaixo de 1.

No Ensaio B, os resultados tenderam a se estabilizar em valores próximos de 1, com exceção das etapas B-01 e B-04 que apresentaram valores abaixo. A análise nas seções instrumentadas apresentou configuração análoga a exposta.

Por fim, foram analisados os dados obtidos de rigidez cíclica em todas as seções instrumentadas. As Figuras 4.27, 4.28, e 4.29 explicitam como se deu a variação de rigidez cíclica nas seções S₁, S₂ e S₃ do Ensaio A, e as Figuras 4.30 e 4.31 nas seções S₁ e S₃ do Ensaio B.

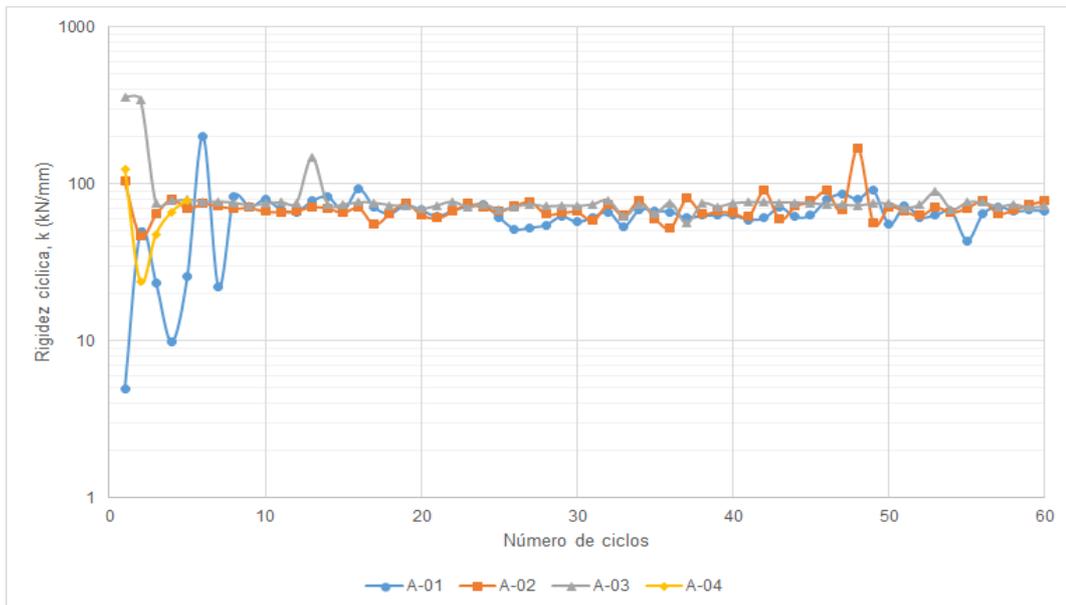


Figura 4.27 – Rigidez cíclica na seção S₁ (Ensaio A: Descarregamento)

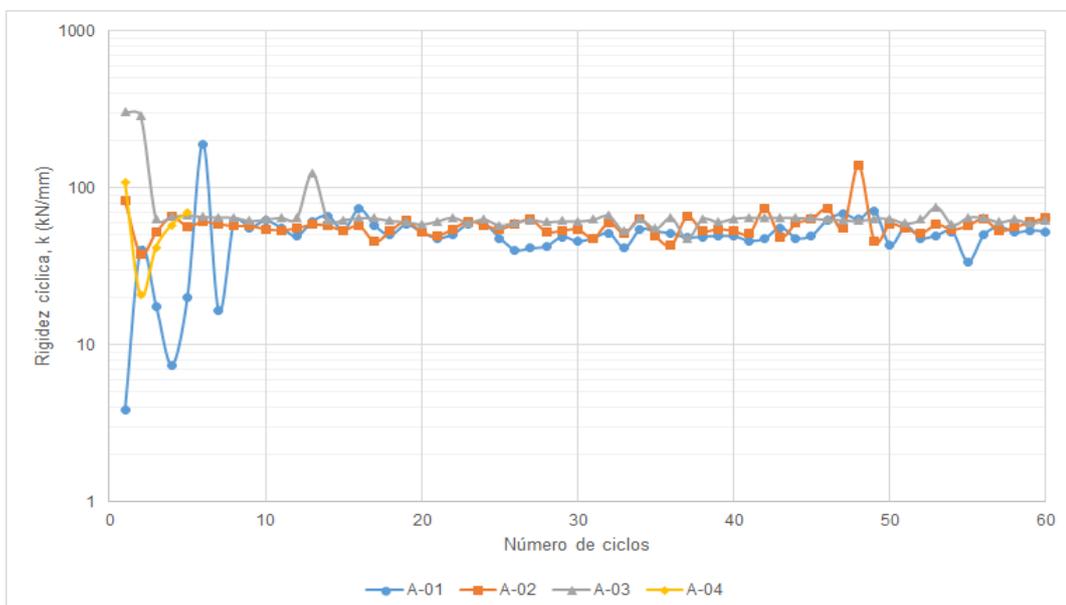


Figura 4.28 – Rigidez cíclica na seção S₂ (Ensaio A: Descarregamento)

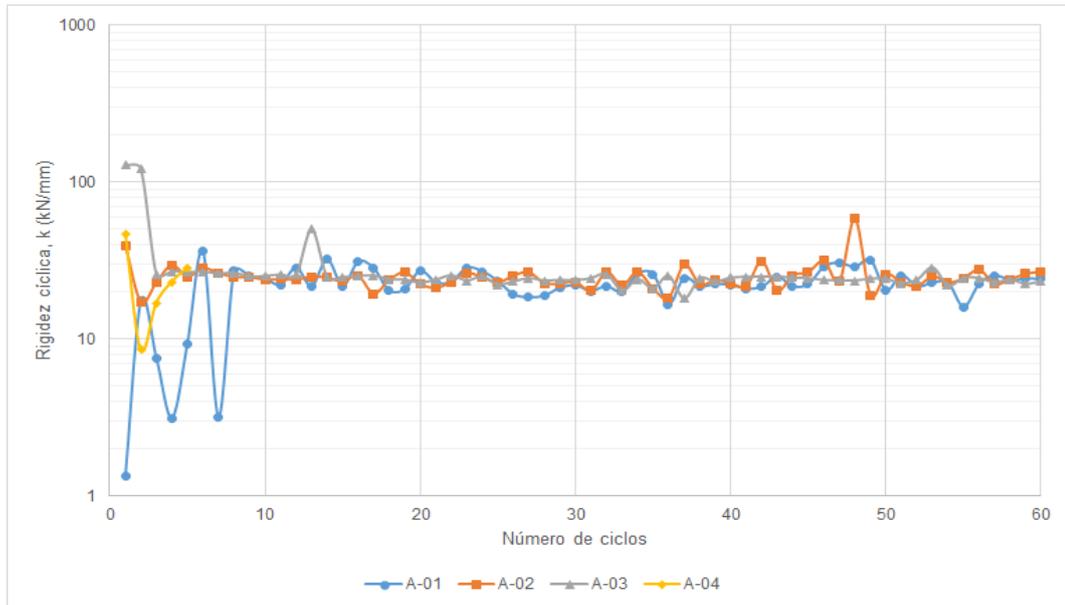


Figura 4.29 – Rigidez cíclica na seção S₃ (Ensaio A: Descarregamento)

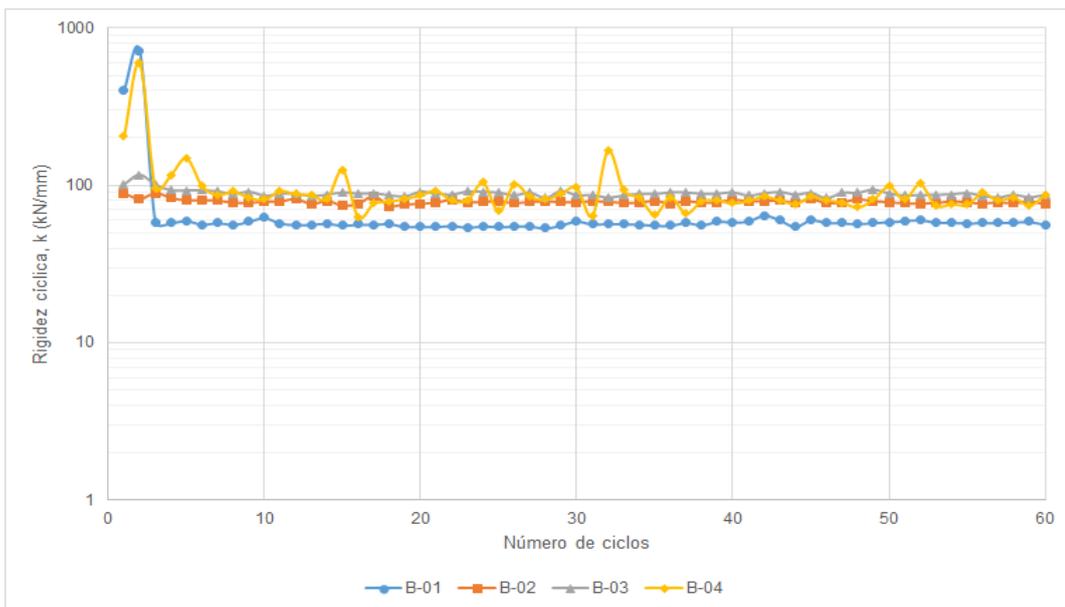
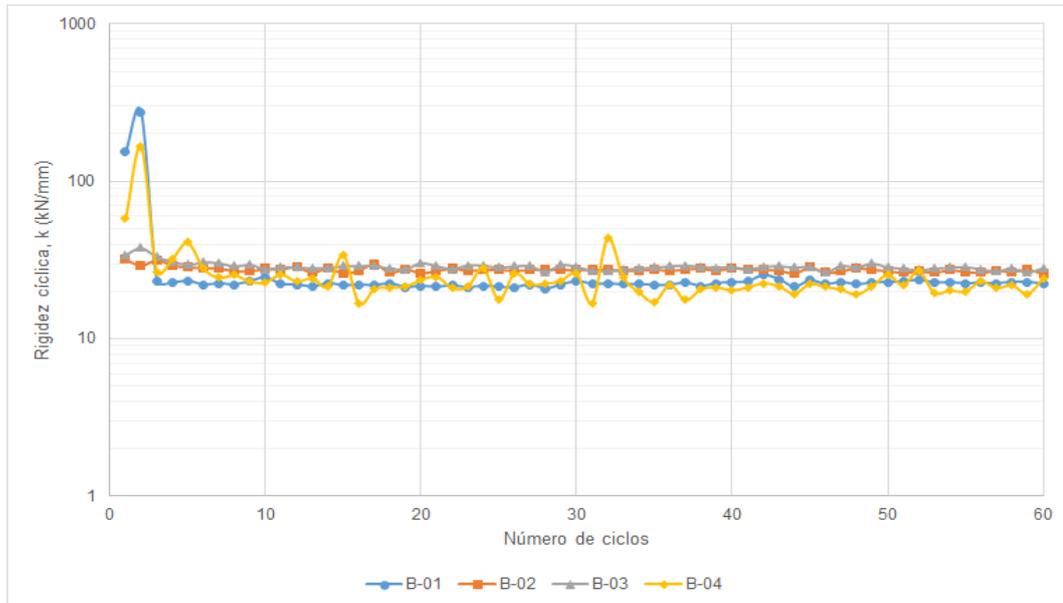


Figura 4.30 – Rigidez cíclica na seção S₁ (Ensaio B: Descarregamento)

Figura 4.31 – Rigidez cíclica na seção S₃ (Ensaio B: Descarregamento)

No Ensaio A, à exceção da etapa A-04, a rigidez cíclica residual após o 10º ciclo convergiu para valores próximos de 70, 60 e 25 kN/mm nas seções S₁, S₂, e S₃, respectivamente. No Ensaio B a rigidez residual apresentou crescimento entre as etapas após o 10º ciclo, porém, devido ao aumento nos fatores de interação, como mostrado na Tabela 4.5, essa evolução não se apresentou de forma organizada, tendendo a valores próximos de 60, 80, 90 e 95 kN/mm na seção S₁ e de 25, 30, 30, 25 kN/mm na seção S₃ para as etapas 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

Para auxiliar o entendimento, as Figuras 4.32 e 4.33 apresentam a relação entre a rigidez cíclica residual (estável) e a profundidade da seção instrumentada para os Ensaio A e B, respectivamente.

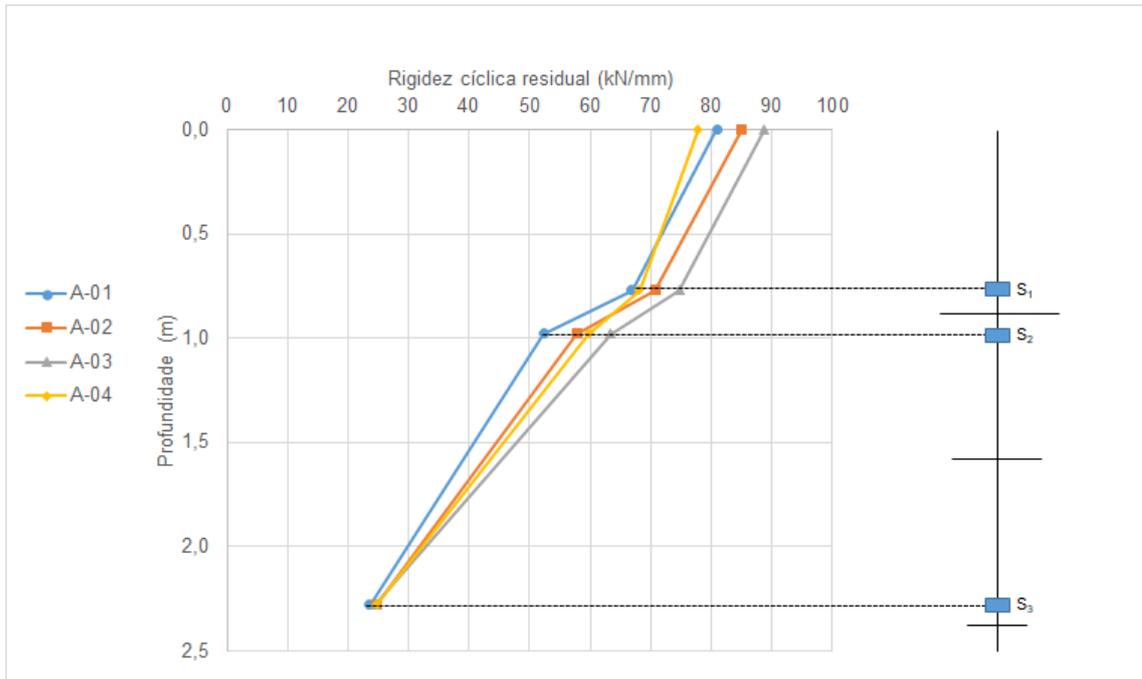


Figura 4.32 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio A: Descarregamento)

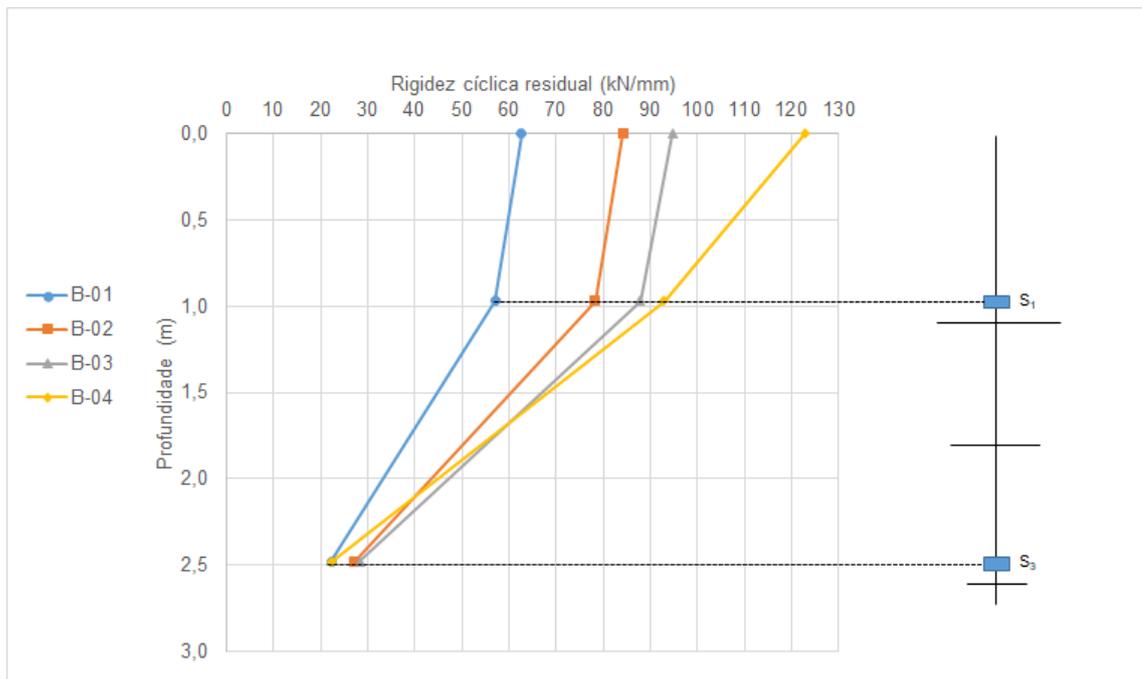


Figura 4.33 – Relação entre a rigidez cíclica residual e a profundidade da seção instrumentada (Ensaio B: Descarregamento)

Analisando as Figuras 4.32 e 4.33, se observa uma redução na rigidez cíclica residual com o aumento na profundidade da seção instrumentada. Novamente, isso prova que durante a instalação das hélices o solo sofre diminuição na densidade e perde, notavelmente, rigidez.

Além disso, se verifica a influência dos fatores de interação na rigidez do sistema. Da mesma forma que no carregamento, no Ensaio A, como os fatores de interação, que eram altos, se mantiveram elevados com o aumento na profundidade (vide Tabela 4.4), a rigidez tendeu a convergir para o mesmo valor em todas as seções e no Ensaio B, como os fatores de interação, que eram inicialmente menores, evoluíram com a profundidade (vide Tabela 4.5), a rigidez apresentou discrepância, mas tendeu a afluir para o mesmo valor em todas as seções com o aumento na profundidade.

Comparando com os resultados obtidos na análise da rigidez cíclica residual no carregamento, os valores de rigidez cíclica residual no descarregamento, mesmo apresentando comportamento semelhante, foram maiores, mostrando que a aplicação de ciclos de carregamento promovem aumento na rigidez do solo e, além do mais, podendo isso ser atribuído aos acúmulos contínuos de deslocamentos plásticos na fase de carga e aos deslocamentos elásticos recuperados na fase de descarga.

4.2.6. Cargas mobilizadas nas hélices ao longo dos ciclos

Para otimização do projeto de estacas helicoidais, foi feita a análise da evolução das cargas nas hélices ao longo dos ciclos. Foram determinadas as cargas mobilizadas nas hélices H₁ e H₃ no Ensaio A e H₃ no Ensaio B e, além disso, o progresso das cargas com a aplicação dos ciclos de carga e descarga. As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam os resultados para o Ensaio A e B, respectivamente.

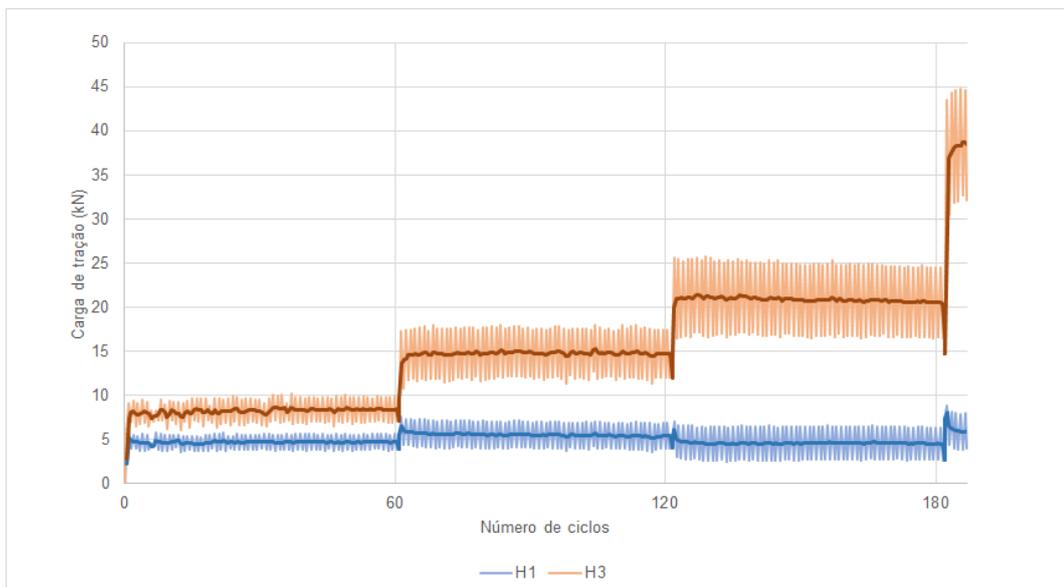
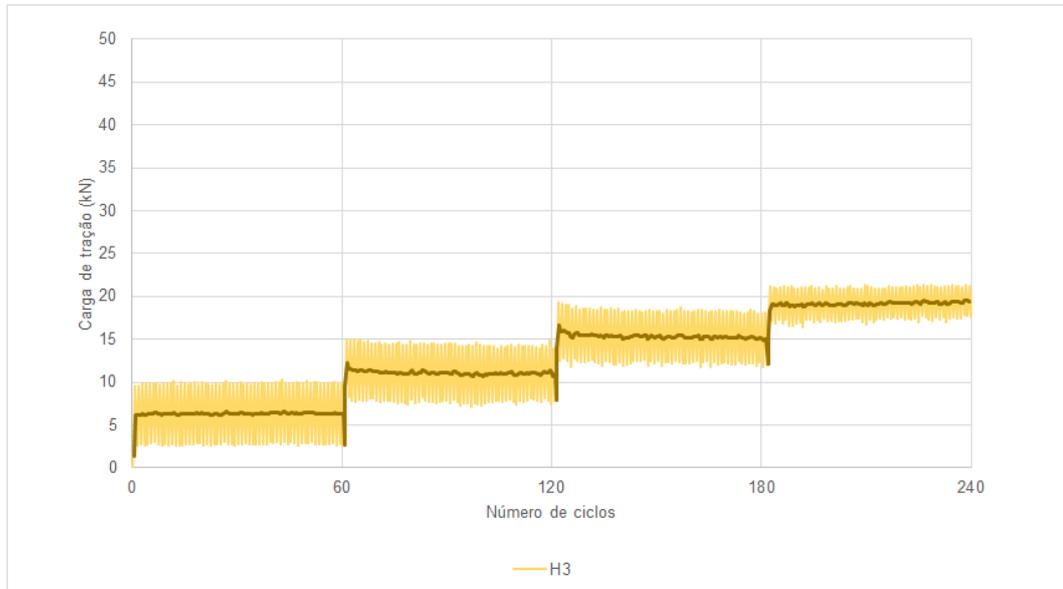


Figura 4.34 – Cargas mobilizadas nas hélices H₁ e H₃ (Ensaio A)

Figura 4.35 – Cargas mobilizadas na hélice H₃ (Ensaio B)

Com os valores expressos do Ensaio A, se percebe que a carga resistida pela hélice H₁, que é a hélice do topo, é baixa e tende a diminuir com o passar dos ciclos, entretanto as cargas resistidas pela hélice H₃ cresceram substancialmente com os ciclos. No Ensaio B, devido problemas na instrumentação (como mencionado anteriormente), não foi possível analisar a H₁, mas os resultados das cargas resistidas pela hélice H₃ também mostraram elevado crescimento das cargas com os ciclos.

É constatado também a influência da amplitude cíclica na carga mobilizada nas hélices. No Ensaio A, onde a amplitude cíclica apresentou aumento a cada etapa, as cargas resistidas pela hélice H₃ aumentaram com o um comportamento acentuado. No Ensaio B, onde a amplitude cíclica se comportou de forma estável, se observou um crescimento moderado das cargas resistidas pela hélice H₃.

Assim como outros pesquisadores (SAKR, 2009; TSUHA *et al.*, 2012a) notaram, os resultados mostraram que a hélice H₃, que é a hélice da ponta, é responsável por maior parte da capacidade de carga. A hélice H₁, devido aos cortes sofridos pelo solo no processo de instalação, apresentou baixos valores de carga mobilizada e, ademais, tendência de redução. Desse modo, esses resultados sugerem que a utilização de uma estaca helicoidal com três hélices talvez seja desnecessária, porém deve-se investigar as condições do solo para cada caso.

4.3. Ensaio com carga estática pós-cíclica

Logo após o Ensaio B, a estaca foi imediatamente submetida a um novo ensaio com carga estática na mesma instalação, esse denominado Ensaio C. O objetivo foi avaliar o efeito de cargas cíclicas prévias sobre a capacidade estática do sistema. Durante cada intervalo de carga e descarga, a carga foi mantida constante por 10 minutos.

Para comparar com os resultados de Queiroz (2018), optou-se por determinar, assim como ele, a capacidade de carga à tração de acordo com o AC308 (ICC-ES, 2007), sendo essa definida como a carga máxima na curva carga-deslocamento. A ruptura ocorreu, de forma nítida, com uma carga de 117 kN. Nas seções S₁ e S₃ a carga de ruptura foi de 101 kN e 33 kN, respectivamente.

A curva carga-deslocamento provida da instrumentação no ensaio com carga estática é mostrada na Figura 4.36. Verifica-se que as cargas cíclicas promoveram um aumento significativo na rigidez do solo acima das hélices, resultando pequenos deslocamentos nos primeiros 100 kN, 80 kN e 20 kN de carregamento no topo da estaca, na seção S₁ e na seção S₃, respectivamente.

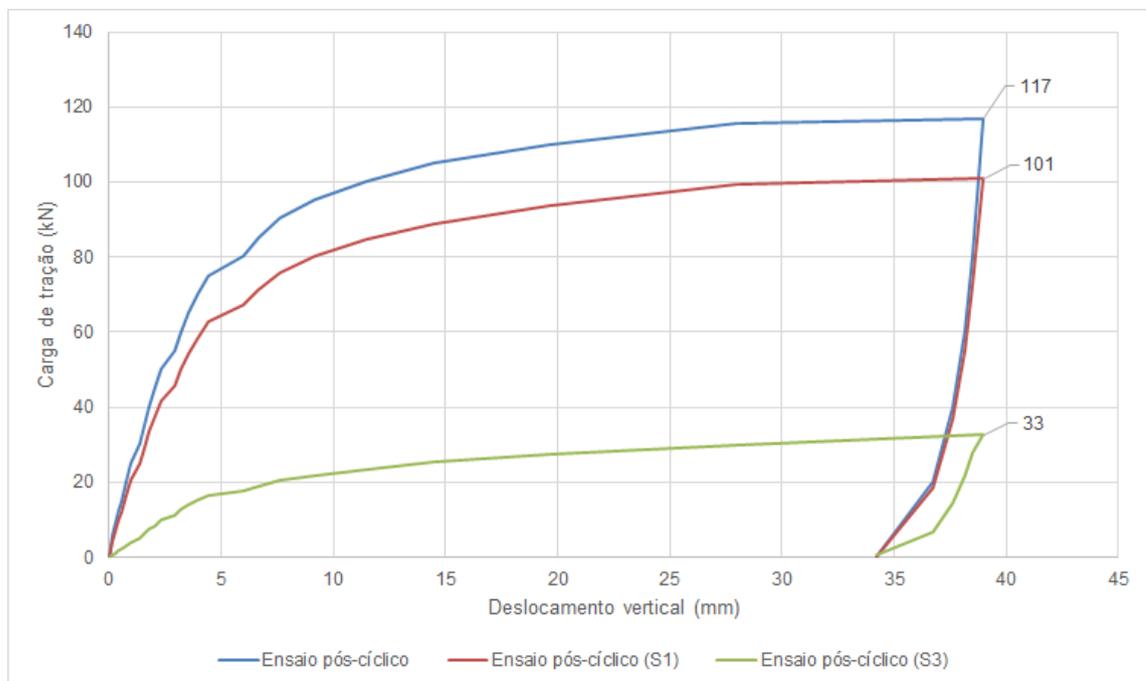


Figura 4.36 – Curva carga-deslocamento do ensaio com carga estática pós-cíclica

Em comparação com os resultados da capacidade de carga estática média obtidos através dos ensaios realizados por Queiroz (2018), que foram de 92, 87 e 36 kN para o topo da estaca, seção S₁ e seção S₃, respectivamente, se verificou um aumento de 25 kN no topo da estaca, 14 kN na seção S₁ e uma redução de 3 kN na seção S₃ que, por sua vez, representa um aumento de mais de 27% no topo da estaca, 16% na seção S₁ e redução de mais de 8% na seção S₃ na carga total. O comparativo é apresentado na Figura 4.37.

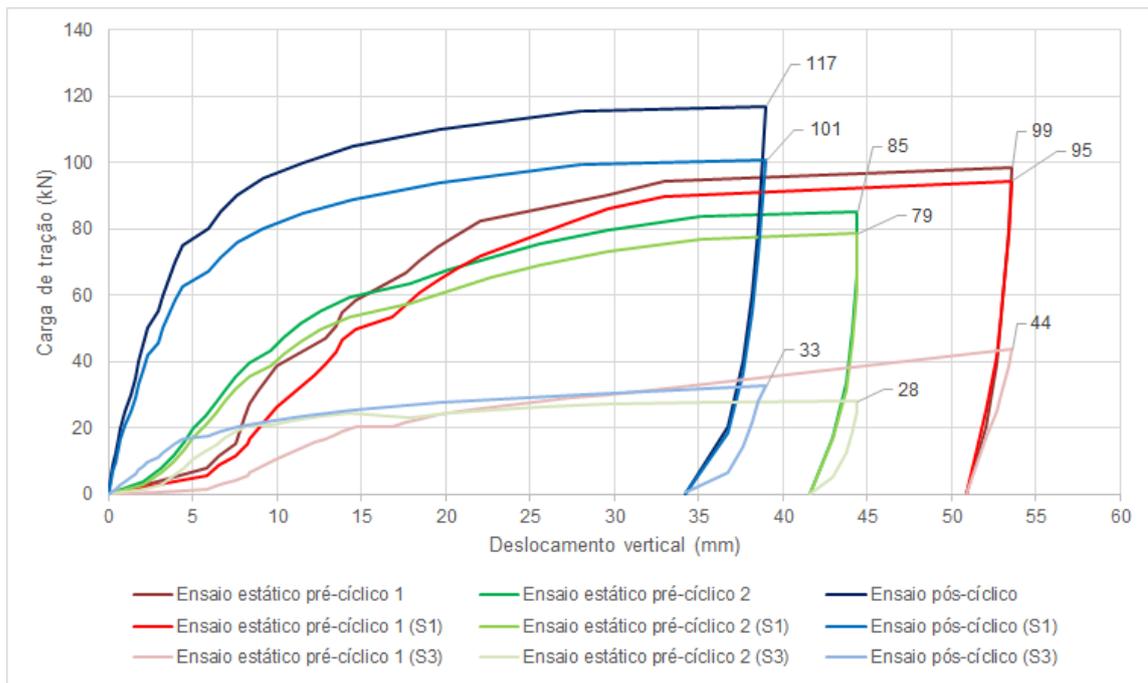


Figura 4.37 – Comparativo entre os resultados pré-cíclicos de Queiroz (2018) e pós-cíclicos

A contribuição de resistência provenientes do fuste e das hélices para o Ensaio C e o comparativo com os resultados obtidos nos ensaios de Queiroz (2018) são apresentados na Tabela 4.10. Os valores de capacidade de carga foram obtidos através do método de Davisson modificado, sendo definidos como a carga que provoca um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro médio das hélices.

Tabela 4.10 – Comparativo entre as parcelas de contribuição de resistências de Queiroz (2018) e do Ensaio C

Ensaio	Total ¹ (kN)	F ₁ ² (kN)	H ₁ +H ₂ +F ₃ ³ (kN)	H ₃ ⁴ (kN)
1 (QUEIROZ, 2018)	92	4	53	35
2 (QUEIROZ, 2018)	80	6	47	27
C	115	16	69	30

Nota:

¹Carga total aplicada na cabeça da estaca, medida pela célula de carga.

²Carga resistida por atrito lateral no fuste acima da hélice de topo, dada pela subtração da carga total pela carga na seção S₁.

³Carga resistida pela hélice H₁, H₂ e o fuste compreendido entre as seções S₁ e S₃. Determinada pela subtração da carga na seção S₁ e S₃.

⁴Carga na hélice de ponta, H₃, obtida na seção S₃.

Com base nos resultados, a contribuição de resistência do fuste superior (F₁) atingiu 14% da carga total e a contribuição de resistência proveniente das hélices chegou a quase 90% da carga total. Além disso, os resultados foram maiores que os obtidos por Queiroz (2018), com exceção da contribuição da hélice da ponta (H₃) no Ensaio 1 (QUEIROZ, 2018) que apresentou valores mais elevados, podendo isso ser atribuído a variabilidade do solo.

4.3.1. Previsão da capacidade de carga à tração

De porte dos parâmetros do solo obtidas por Costa (2017b) e das profundidades de instalação apresentadas na Tabela 4.1, foi estimada a capacidade de carga pós-cíclica através do método do cilindro de cisalhamento, do método de capacidades individuais e do método empírico (as equações para cada método foram apresentadas no 2º CAPÍTULO: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA).

As capacidades de carga estimadas e a capacidade de carga obtida através do método de Davisson modificado no ensaio com carga estática pós-cíclica são mostradas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Previsão da capacidade de carga à tração

Ensaio	Q _u ¹ (kN)	Q _{u, CC} ² (kN)	Q _{u, CI} ³ (kN)	Q _{u, ME} ⁴ (kN)
C	115	70	111	87

Nota:

¹Capacidade de carga obtida através do método de Davisson modificado.

²Capacidade de carga obtida através do método do cilindro de cisalhamento.

³Capacidade de carga obtida através do método de capacidades individuais.

⁴Capacidade de carga obtida através do método empírico.

Percebe-se que o método do cisalhamento cilíndrico subestimou consideravelmente a capacidade de carga obtida na prova de carga, enquanto que o método das capacidades individuais apresentou valores também menores, porém bastante próximos. No método empírico, o K_t utilizado foi de 11,4 m⁻¹, obtido por Queiroz (2018), e o torque de instalação,

obtido durante a instalação da estaca, foi de 7,6 kN.m, resultando em um valor estimado de capacidade de carga notavelmente menor do que a carga obtida na prova de carga. Desse modo, o método que mais se aproximou do valor obtido na prova de carga foi o método das capacidades individuais.

Não foi possível prever o fator de capacidade de carga pós-cíclica da hélice pela Equação 2.15 de Schiavon (2016), pois a mesma é válida para o intervalo de $0,4 < Q_{\text{média}}/Q_T < 0,7$ e no Ensaio B a razão $Q_{\text{média}}/Q_T$ foi 0,87. Além disso, a equação foi originalmente criada para areias densas o que poderia ocasionar erros de previsão em areia menos densa, situação do solo exposto no trabalho.

5º CAPÍTULO: CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresenta uma análise do comportamento de estacas helicoidais instrumentadas, submetidas a cargas cíclicas e pós-cíclicas, instaladas em um depósito de areia pura. A estaca foi instrumentada em três seções ao longo do fuste e foram realizadas duas provas de carga cíclica quase-estática à tração e uma prova de carga estática à tração para verificar os efeitos do carregamento cíclico.

Os ensaios com carga cíclica quase-estática à tração foram realizados em quatro etapas. No primeiro ensaio, os incrementos de carga foram crescentes a cada etapa, resultando em aumento das cargas cíclicas médias e amplitudes cíclicas. No segundo ensaio, os incrementos de carga foram constantes, o que provocou novamente aumento das cargas cíclicas médias, porém as amplitudes cíclicas se mantiveram uniformes.

Os resultados mostraram uma grande influência do modo como os incrementos de carga foram empregados, devido atuarem no processo de densificação e perturbação do solo circunvizinho da estaca. Incrementos de carga crescentes proporcionaram maior interação entre as etapas, maiores deslocamentos acumulados e maiores taxas de acumulação média de deslocamento.

Os deslocamentos acumulados tenderam a se estabilizar após o 10º ciclo de carga e descarga. Além disso, não foram obtidas baixas taxas de acumulação média de deslocamento. Quando foram empregados incrementos de carga crescentes, os deslocamentos acumulados aumentaram em taxas mais rápidas quando as cargas médias aplicadas na estaca foram superiores a 40% da capacidade de carga estática à tração. Já quando foram utilizados incrementos de carga constantes, as taxas de acumulação média de deslocamento diminuíram moderadamente com o passar das etapas. O número de ciclos antes da ruptura também apresentou dependência da carga média e da amplitude cíclica.

Com a instrumentação, constatou-se que a contribuição de resistência proveniente das hélices foi responsável pela maior parte da resistência axial, sendo as hélices do meio e ponta responsáveis por cerca de 80% da carga resistida. Além disso, foi observada uma redução na rigidez cíclica residual com o aumento na profundidade ao longo do fuste. Finalmente, se percebeu a influência dos fatores de interação que, por representarem um recarregamento, elevaram a rigidez do solo e, conseqüentemente, reduziram os deslocamentos correspondentes.

Na avaliação da estabilidade das estacas quando submetidas ao carregamento cíclico, cargas estáveis foram alcançadas, em geral, com amplitudes cíclicas abaixo de 13% da capacidade de carga estática à tração. A carga instável foi alcançada com amplitude cíclica acima de 22% da capacidade de carga estática à tração. Verificou-se ainda que nas zonas estável e metaestável a rigidez cíclica no carregamento apresentou valores mais elevados. Isso também foi verificado na condição de descarregamento. Comparando com os resultados obtidos na análise da rigidez cíclica residual no carregamento, os valores de rigidez cíclica residual no descarregamento, mesmo apresentando comportamento semelhante, foram maiores, mostrando que a aplicação de ciclos de carga e descarga promovem aumento na rigidez do solo.

Através da análise das cargas mobilizadas nas hélices ao longo dos ciclos, se verificou que a contribuição de resistência proveniente da hélice da ponta foi responsável pela maior parte da capacidade de carga. Entretanto, isso não deve ser generalizado, sendo necessário investigar as condições do solo para cada caso.

O ensaio com carga estática à tração, realizado logo após os ensaios com carga cíclica quase-estática à tração, mostrou um aumento na capacidade de carga total devido a compactação do solo durante o carregamento cíclico.

Comparando os resultados das provas de carga à tração com os obtidos através dos métodos de previsão de capacidade de carga, o que mais se aproximou do valor obtido em campo foi o método das capacidades individuais.

5.1. Sugestões para futuras pesquisas

Algumas informações não foram abordadas na pesquisa e com isso, para futuras pesquisas em fundações em estacas helicoidais, recomenda-se:

- Avaliar a inclinação da estaca helicoidal no processo de instalação;
- Verificar o comportamento das estacas helicoidais em grupo;
- Analisar as estacas helicoidais quando submetidas às cargas laterais cíclicas;
- Simular o comportamento das estacas helicoidais com modelos numéricos que possam reproduzir o endurecimento e a degradação cíclica dos solos;
- Realizar ensaios de prova de carga à compressão com estaca instrumentada.

REFERÊNCIAS

- A. B. CHANCE CO. (2014). Technical Design Manual, Edition 3. ATLAS, Hubbel, 414 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 17 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006). NBR 12131: Estacas – Prova de Carga Estática – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, RJ.
- ANDERSEN K. A.; PUECH A. A.; JARDINE R. J. (2013). Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering and other applications. Paris, TC-209 Workshop, “Design for cyclic loading: piles and other foundations”, Publisher: Presses des Ponts, p. 9-44.
- ASTM INTERNATIONAL – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2013). D3689M-07: Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load. West Conshohocken, PA.
- BSI. (1986). BS 8004 British standard code of practice for foundations. British Standards Institution (BSI), London.
- CARVALHO, I. P. G. (2007). Estudo teórico-experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 179 p.
- CERATO, A. B.; VICTOR, R. (2009). Effects of Long-Term Dynamic Loading and Fluctuating Water Table on Helical Anchor Performance for Small Wind Tower Foundations. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 23, n. 4, p. 251-261. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CHAN, S.; HANNA, T. H. (1980). Repeated loading on single piles in sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106 (2): 171-188.
- COSTA, G. F. (2017a). Análise da zona de perturbação causada pela instalação de estacas helicoidais em solo arenoso. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 19 p.
- COSTA, J. P. da S. (2017b). Uplift behaviour of helical piles in sand subjected to cyclic loading. 126 p. Master’s Thesis – Department of Civil Engineering, Centre of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte.
- CZM FOUNDATION EQUIPMENT (2018). MC150: Technical Specifications. São Paulo.

- D'AGUIAR, S. C.; MODARESSI, A.; DOS SANTOS, J. A.; LOPEZ-CABALLERO, F. (2011). Piles under cyclic axial loading: study of the friction fatigue and its importance in pile behavior. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, n. 10, p. 1537-1550. Canadian Science Publishing.
- DAS, B. M. (1990). *Earth Anchors*. Elsevier Science Publisher. New York. 241 p.
- DAVISSON, M. T. (1972). High Capacity Piles. In *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago (March), p. 81-112.
- FDOT. (1999). *Standard specifications for road and bridge construction*. Florida Department of Transportation (FDOT), Tallahassee, Fla.
- GAVIN, K.; DOHERTY, P.; TOLOOIYAN, A. (2014). Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 51, n. 11, p. 1343-1354. Canadian Science Publishing.
- GOSSTROY – STATE COMMITTEE FOR CONSTRUCTION IN THE SOVIET UNION (1985). *SNiP 2.02.03-85: Pile Foundations*. Moscow, RU.
- HOYT, R. M.; CLEMENCE, S. P. (1989). Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil. *Proceedings of The Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2, p. 1019-1022.
- INTERNATIONAL CODE COUNCIL - EVALUATION SERVICES (2007). *AC308: Acceptance Criteria for Helical Pile Foundations and Devices*. Washington, DC.
- ISSMFE. (1985). Axial pile loading test-part I: static loading. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, vol. 8(2), p. 79-89.
- JARDINE, R. J.; STANDING, J. R. (2012). Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. *Soils and Foundations*, Elsevier BV, v. 52, n. 4, p. 723-736.
- JESUS, A. P. (2002). *Caracterização Geológica, Geomorfológica e Geotécnica de um Corpo de Dunas na Cidade de Natal/RN*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 214 p.
- KARLSRUD, K.; NADIM, F.; HAUGEN, T. (1986). Piles in clay under cyclic axial loading: field tests and computational modeling. In: I. F. Chaisées (Ed.), *Proceedings of the 3rd International Conference of Numerical Methods in Offshore Piling*. Nantes: Technip, p. 165-190.
- LI, W.; DENG, L. (2018). Axial load tests and numerical modeling of single-helix piles in cohesive and cohesionless soils. *Acta Geotechnica*, p. 1-15. Springer Nature.
- LI, W.; ZHANG, D. J. Y.; SEGO, D. C.; DENG, L. (2018). Field Testing of Axial Performance of Large-Diameter Helical Piles at Two Soil Sites. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 3, p. 060170211-060170215. American Society of Civil Engineers (ASCE).

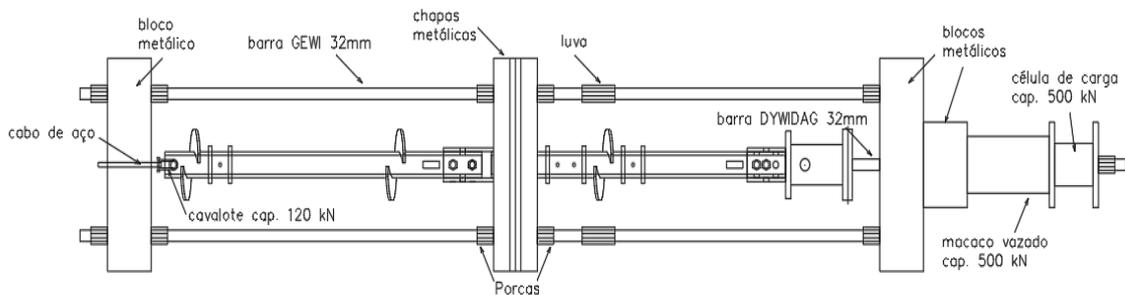
- LIVNEH, B.; EL NAGGAR, M. (2008). Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45(8), p. 1142-1155.
- LUTENEGGER, A. J.; ERIKSON, J.; WILLIAMS, N. (2014). Evaluating Installation Disturbance of Helical Anchors in Clay from Field Vane Tests. *Deep Foundations Institute*, p. 129-138.
- MERIFIELD, R. S. (2011). Ultimate Uplift Capacity of multiplate Helical Type Anchors in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 137, n. 7, p. 704-716. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- MEYERHOF, G. G.; ADAMS, J. I. (1968). The Ultimate Uplift Capacity of Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 5 (4), p. 225-244.
- MITSCH, M. P.; CLEMENCE, S. P. (1985). The uplift capacity of helix anchors in sand. Uplift behavior of anchors foundations in soil. *Proceedings of a Section Sponsored by Geotechnical Engineering Division of ASCE in conjunction of ASCE convention in Detroit, Michigan*, p. 26-47.
- NUNES, E. (1996). Aspectos morfoestruturais, fisiográficos e de coberturas de alteração intempéricas da Grande Natal (RN), com base para o macrozoneamento geoambiental. Tese (Doutorado). Rio Claro-SP, UNESP, 172 p.
- PERKO, H. A. (2000). Energy Method for Predicting the Installation Torque of Helical Foundations and Anchors. *New Technological and Design Developments in Deep Foundation Technologies*, American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 342-352.
- PERKO, H. A. (2009). *Helical piles: A practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons, NY.
- POULOS, H. G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 114, n. 8, p. 877-895.
- QUEIROZ, F. L. (2018). Avaliação de instalação e desempenho em terreno arenoso de uma estaca helicoidal instrumentada. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 86 p.
- REESE, L. C.; O'NEILL, M. W. (1988). *Drilled shafts: construction procedures and design methods*, FHWA-HI-88-042. Federal Highway Administration, McLean, Va.
- RIMOY, S. P. (2013). Ageing and axial cyclic loading studies of displacement piles in sands. PhD Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, 397 p.
- RIMOY, S.; JARDINE, R.; STANDING, J. (2013). Displacement response to axial cycling of piles driven in sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, vol. 166, n. 2, p. 131-146.
- SAKR, M. (2009). Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 46(9), p. 1046-1061.

- SANHUEZA, M. I. A. (2012). Evaluación del Diseño de Fundaciones con Micro Pilotes Tipo Tornillo en Torres de Alta Tensión. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Valdivia Chile, 163 p.
- SANTOS FILHO, J. M. S. M. (2014). Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical. Dissertação (Mestrado). Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 117 p.
- SCHIAVON, J. A. (2016). Behavior of helical anchors subjected to cyclic loading. Doctoral Thesis under joint supervision between the University of São Paulo and Nantes Angers and Le Mans University, São Carlos, SP, 300 p.
- SILVEIRA, J. D. (1964). Morfologia do litoral. In: Azevedo A. (ed.) Brasil: A terra e o homem. São Paulo, Editora Nacional, p. 253-305.
- STEPHENSON, R. W. (2003). Design and Installation of Torque Anchors for Tiebacks and Foundations. Missouri University of Science and Technology, Rolla, 45 p.
- TERZAGHI, K. (1943). Theoretical soil mechanics. Wiley, New York.
- TROFIMENKOV, Y. G.; MARIUPOL'SKII, L. G. (1964). Screw piles as foundations of supports and towers of transmission lines. Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1 (4), p. 232-239.
- TSUHA, C. H. C. (2007). Modelo teórico para controle da capacidade de carga a tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 253 p.
- TSUHA, C. H. C.; AOKI, N.; RAULT, G.; THOREL, L.; GARNIER, J. (2012a). Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. Canadian Geotechnical Journal, vol. 49 (9), p. 1102-1114.
- TSUHA, C. H. C.; FORAY, P.; JARDINE, R.; YANG, Z.; SILVA, M.; RIMOY, S. (2012b). Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. Soils and foundations, vol. 52 (3), p. 393-410.
- URABE, K.; TOKIMATSU, K.; SUZUKI, H.; ASAKA, Y. (2015). Bearing capacity and pull-out resistance of wing piles during cyclic vertical loading. In Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Christchurch, New Zealand.
- USACE ENGINEERING AND DESIGN MANUAL (1991). Design of pile foundations, EM 1110-2-2906, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- WICHTMANN, T. (2005). Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading. PhD thesis, Ruhr University Bochum, Bochum, 288 p.
- ZHANG, L. M.; LI, D. Q.; TANG, W. H. (2005). Reliability of bored pile foundations considering bias in failure criteria. Canadian Geotechnical Journal, v. 42, n. 4, p. 1086-1093.

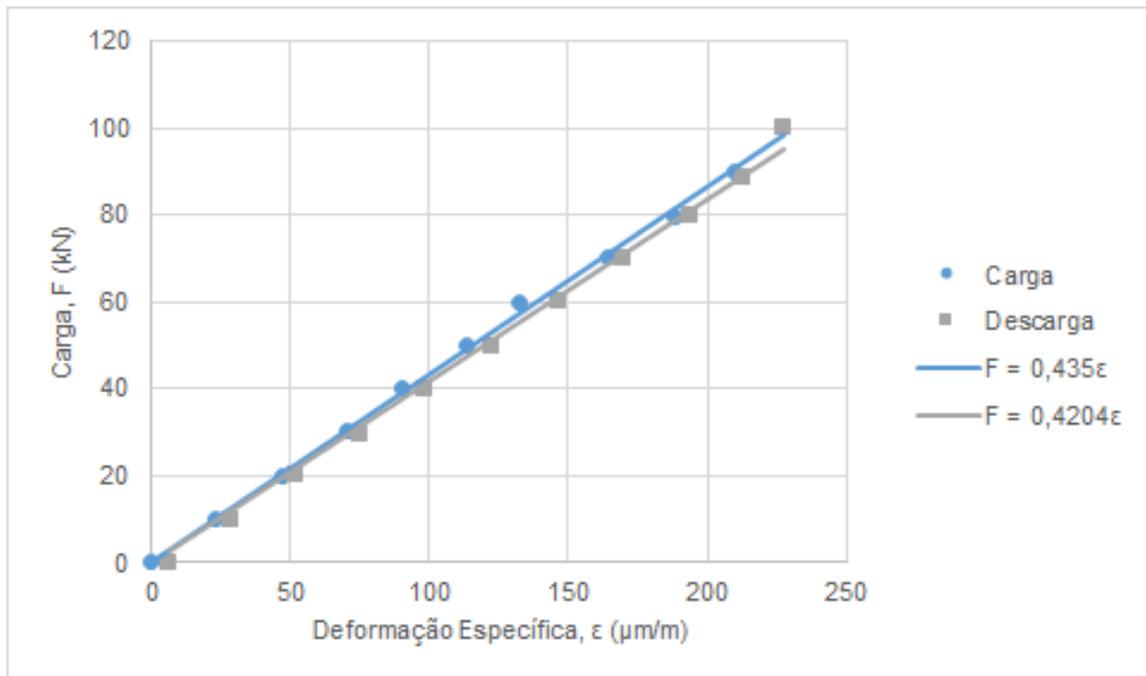
ANEXOS

Todo o processo de calibração das seções instrumentadas está exposto no trabalho realizado por Queiroz (2018). Segundo ele, todas as seções apresentaram um comportamento linear da relação carga axial-deformação e, ademais, muito pouca histerese.

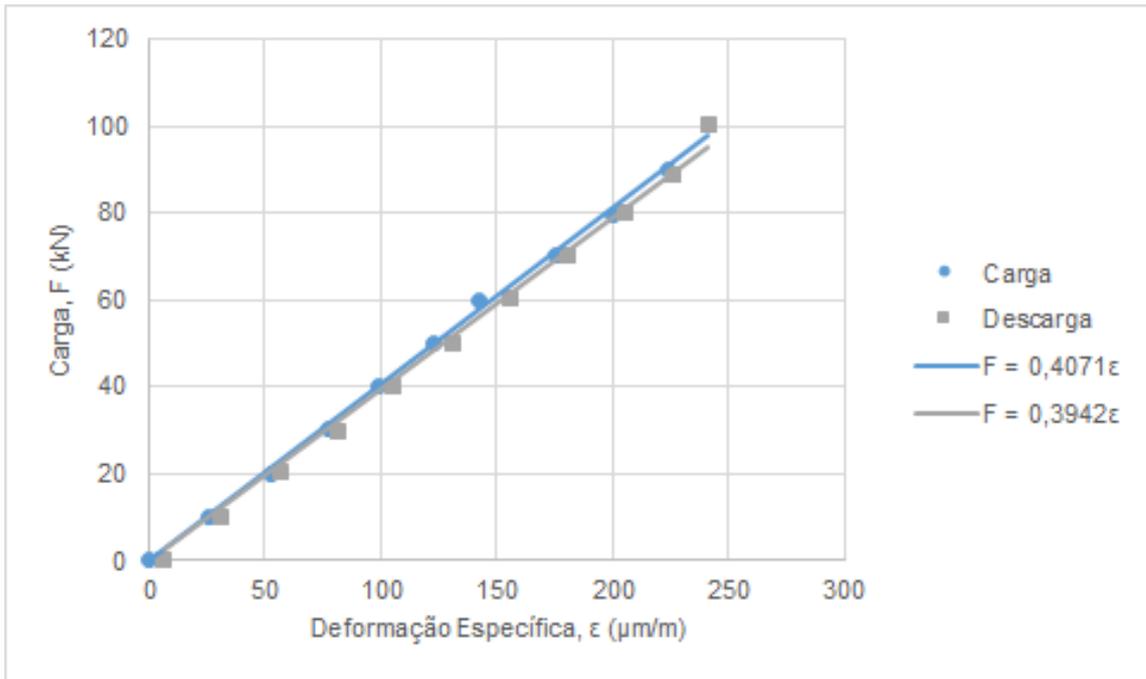
O procedimento se deu mediante aplicação de carga de tração, onde testou-se o funcionamento da instrumentação e determinou o modulo de elasticidade da estaca helicoidal. O esquema do aparato utilizado para calibrar as seções instrumentadas e os gráficos de calibração das seções S_1 , S_2 e S_3 são mostrados em ordem a seguir.



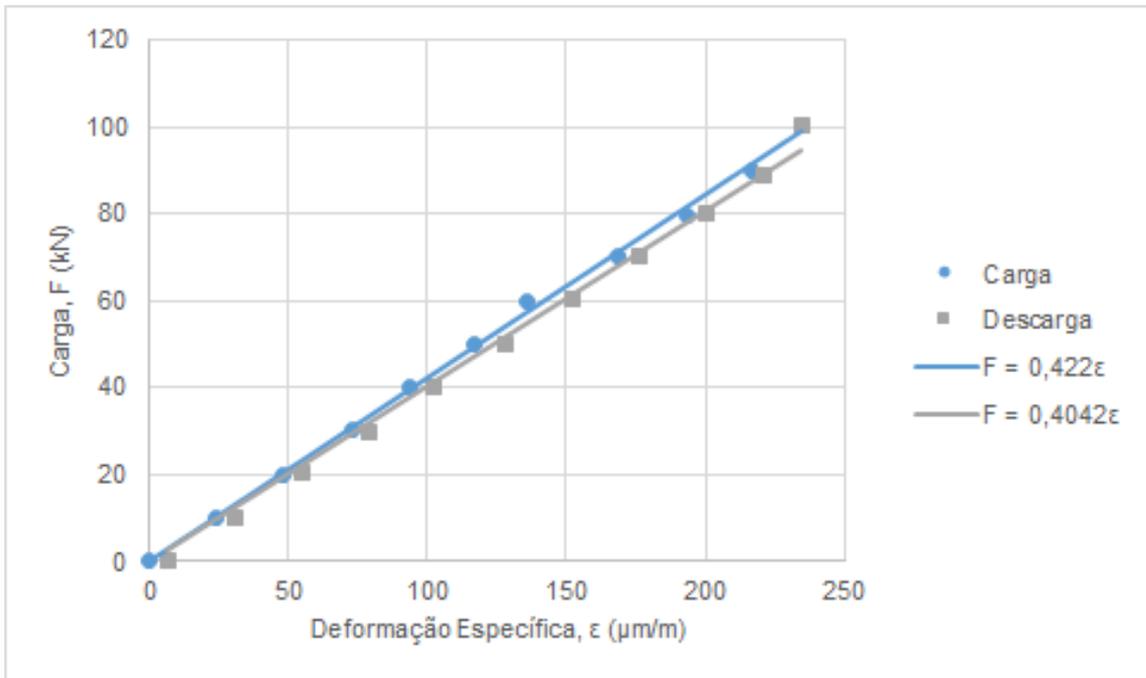
Esquema do aparato para o ensaio de calibração das seções instrumentadas (QUEIROZ, 2018)



Calibração da seção S_1 (QUEIROZ, 2018)



Calibração da seção S₂ (QUEIROZ, 2018)



Calibração da seção S₃ (QUEIROZ, 2018)