

DIEGO MOREIRA DA SILVA

Estudo em câmara de calibração do comportamento de fundações por  
estacas helicoidais em areia muito compacta

Versão corrigida

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

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr. Cristina de  
Hollanda Cavalcanti Tsuha

São Carlos  
2020

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

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

M586e           Moreira da Silva, Diego  
                  Estudo em câmara de calibração do comportamento  
de fundações por estacas helicoidais em areia muito  
compacta / Diego Moreira da Silva; orientadora Cristina  
de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos, 2020.

                  Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e  
Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2020.

                  1. Estaca helicoidal. 2. Fundações. 3.  
Ancoragens. 4. Areia. 5. Câmara de calibração. 6.  
Modelagem física. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **DIEGO MOREIRA DA SILVA**.

Título da tese: "Estudo em câmara de calibração do comportamento de fundações por estacas helicoidais em areia muito compacta".

Data da defesa: 26/06/2020.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

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

Aprovado

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

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Saboya Albuquerque Júnior**  
(Universidade Estadual do Norte Fluminense/UENF)

Aprovado

Prof. Dr. **Daniel Dias**  
(Université Grenoble Alpes/Joseph Fourier)

Aprovado

Prof. Dr. **Matias Illanes Silva**  
(Universidad Técnica Federico Santa María/Chile)

Aprovado

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

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

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à DEUS.

À toda a minha família, em especialmente a minha esposa, Marcela, por todo o amor, compreensão e ajuda durante todo o doutorado.

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

À banca examinadora, Daniel Dias, Fernando Danziger, Fernando Saboya e Matias Silva por aceitarem estar na banca e, assim, poderem contribuir através de críticas e questionamentos a presente tese.

Ao Evaldo, Bruno e ao “Madruga” da Pepthus usinagem por todo o suporte dado durante a fabricação e instalação da câmara de calibração (e acessórios) deste trabalho.

À Vercon Industrial e a Vértice por todo o suporte no fornecimento de materiais, equipamentos e pessoal na fabricação das estacas. Além do suporte financeiro para a compra da bolsa de reação.

Ao Edilson da Conbor Borrachas Técnico Industriais Ltda por nós ajudar a fazer a bolsa de reação.

Aos técnicos da oficina mecânica da EESC que ajudaram com trabalho de montagem, soldagem e furação em várias peças de aço (inclusive no contêiner) para que eu pudesse fazer as calibrações da estaca helicoidal.

Aos técnicos Vivaldo e Donizete da manutenção da EESC que fizeram a instalação elétrica/eletrônica do contêiner usado para a realização dos ensaios na câmara de calibração.

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

À todas as pessoas do Grupo de Fundações (Bruno, João Gabriel, João Manuel, José Schiavon, Juliana Pessin, Malcon, Mara, Matheus, Milena, Ricardo, Thaíse, Zorany) que em algum momento da minha pesquisa, ajudaram seja físico ou mentalmente, que muito contribuíram no

desenvolvimento deste trabalho e a realização de ensaios no campo experimental e/ou no laboratório de Geotecnia.

Aos amigos mestrandos, doutorandos e pós- doutorandos do departamento de Geotecnia pela boa convivência e compartilhamento de conhecimento.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e pelo projeto Universal (Processo 425770/2016-8) que financiou a pesquisa.

“É sempre divertido fazer o impossível” (Walt Disney)

## RESUMO

SILVA, D.M. Estudo em câmara de calibração do comportamento de fundações por estacas helicoidais em areia muito compacta. 2020. 316 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Ensaio em câmara de calibração têm sido utilizados em vários estudos para investigar o comportamento de fundações por estacas sob condições controladas. Nos ensaios de campo em verdadeira grandeza, instrumentações de estacas e do solo são onerosas e em alguns casos difíceis de realizar. Além disso, a variabilidade do solo é um obstáculo para comparações, e para avaliar efeitos geométricos no comportamento das fundações por estacas. Deste modo, os ensaios em câmara de calibração podem ser uma abordagem interessante para explorar alguns aspectos da interação solo-estaca. Por essa razão, uma câmara de calibração de grande porte foi construída na Universidade de São Paulo (ESSC/USP) para investigar o comportamento de fundações por estacas helicoidais. Para este fim, a presente tese foi dividida em duas partes. Na primeira parte, a câmara de calibração foi projetada e construída. Nesta parte, foi realizada uma modelagem numérica para definir as dimensões do tanque e outros acessórios, para que o equipamento pudesse reproduzir uma simulação aceitável das condições de campo. Na segunda e principal parte da tese, vários experimentos foram realizados em estacas modelo instrumentadas instaladas em areia sob condições de sobrecarga vertical controladas, a fim de investigar alguns aspectos fundamentais para o projeto de fundações por estacas helicoidais ainda pouco estudados até o momento. As forças de instalação e o comportamento carga-deslocamento das fundações helicoidais dependem das características das placas helicoidais. Portanto, para este estudo, nove ensaios em câmara de calibração foram realizados, em estacas instrumentadas de hélice única em areia muito compacta, para avaliar a influência da área da hélice e da condição de sobrecarga vertical nas forças de instalação e no desempenho das fundações helicoidais submetidas a esforços de tração e de compressão. Para ajudar na compreensão do comportamento da fundação estudada, sensores de tensão vertical foram instalados no solo. Para as configurações e condições das estacas testadas nesta tese, os resultados dos experimentos mostraram que: (i) a área da hélice influencia o torque de instalação, mas não influencia as forças verticais de instalação; (ii) a tensão de ruptura relativa a hélice da estaca submetida a tração diminui com o aumento da área, no entanto a área da

hélice não influencia a tensão de ruptura relativa a hélice da estaca submetida a compressão;  
(iv) o fator de torque (razão entre capacidade de carga a tração e torque de instalação) tende a diminuir quando a tensão de sobrecarga vertical aumenta.

**Palavras Chaves:** Estaca helicoidal. Fundações. Ancoragens. Areia. Câmara de calibração. Modelagem física.



## ABSTRACT

SILVA, D.M. A calibration chamber study of helical piles behaviour in very dense sand. 2020. 316 p. Thesis (Doctorate) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

Calibration chamber tests have been used in several studies to investigate pile behaviour under controlled conditions. In full scale field tests, pile and soil measurements are expensive and in some cases difficult to make; additionally, the soil variability is an obstacle for comparisons and to evaluate geometrical effects on the pile response. Therefore, calibration chamber tests are an attractive approach to explore some aspects of pile-soil interaction. For this reason, a large calibration chamber was constructed at the University of São Paulo (ESSC/USP) to investigate the behaviour of helical piles. For this purpose, the current thesis was divided into two parts. In the first part the calibration chamber was designed and built. For this part, numerical modelling were performed to define the dimensions of the tank and other accessories to reproduce a reasonable simulation of field conditions. In the second and main part, several experiments were carried out on instrumented model piles embedded in sand at controlled vertical confining pressure, in order to investigate some key aspects fundamental to the design of helical foundations which are not well understood to date. The installation forces and load-displacement performance of helical foundations are dependent on the characteristics of the helical plates. Therefore, for this study nine calibration chamber tests were conducted on instrumented single-helix piles in very dense sand to evaluate the influence of helix bearing area and vertical confining stress on the installation forces, and on the performance of helical piles under tensile and compressive loads. To help understand the behavior of the studied foundation, pressure sensors were installed in the soil. For the pile configurations and conditions tested in this thesis, the results of the experiments showed that: (i) the helix area influences the installation torque but does not influence the installation vertical forces; (ii) the ultimate helix bearing pressure in tension decreases with the increase of the helix area, however the helix area has no effect on the ultimate bearing pressure under compression; (iv) the torque factor (uplift capacity-torque ratio) tends to decrease when the vertical confining stress increase.

**Key Words:** Helical piles. Foundations. Anchors. Sand. Calibration chamber tests. Physical modelling.

# Índice de Figuras

Figura 3.1: Farol de Maplin Sands.....	13
Figura 3.2: Piers apoiados por estacas helicoidais:(a) Eastbourne; (b) Bournemouth; (c) Palace .....	14
Figura 3.3: (a) Hélices recém formadas, (b) Soldagem de uma hélice à haste central de uma estaca.....	15
Figura 3.4: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal. ....	16
Figura 3.5: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas .....	17
Figura 3.6: Equipamento de instalação de estacas helicoidais.....	19
Figura 3.7: (a) Torquímetro para acompanhamento da instalação, (b) detalhe do torquímetro	20
Figura 3.8: (a) Estaca modelo após ensaio de tração sob tensão confinante controlada (Nagata e Hirata (2015)); (b) Estaca modelo testada em centrífuga após deslocamento em tração de 0,2D (Perez <i>et al.</i> 2018); (c) Estaca modelo após ensaio de tração em câmara de calibração (Nagai <i>et al.</i> 2018). ....	24
Figura 3.9: Diagrama de esforços em estaca helicoidal submetida a esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método das capacidades individuais .....	26
Figura 3.10: Fator de capacidade de carga para areia .....	27
Figura 3.11: Resistência mobilizada em uma estaca helicoidal submetida a esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método de ruptura cilíndrica. ....	28
Figura 3.12: Mecanismo de penetração de uma hélice .....	34
Figura 3.13: Tipos de condição de contorno para câmara de calibração .....	38
Figura 3.14: Resultados de ensaios triaxiais com areia de Toyura preparados por dois 2 métodos diferentes.....	44

Figura 3.15: Estruturas de um solo natural em (a) Depósito de água salgada não perturbado; (b) Depósito de água doce não perturbado; e (c) Completamente Amolgada. ....	47
Figura 3.16: Distribuição de pressão nas estacas .....	52
Figura 3.17: Métodos de instalação da estaca .....	53
Figura 4.1: Geometria utilizada no corpo de prova no PLAXIS 8.5 .....	56
Figura 4.2: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos ensaios triaxiais para: (a) $\sigma_3 = 50$ kPa, (b) $\sigma_3 = 100$ kPa; e (c) $\sigma_3 = 200$ kPa.....	56
Figura 4.3:(a) Gráfico $\sigma \times \varepsilon$ mostrando o trecho pós-pico (residual); (b) Eixos de Lambe .....	60
Figura 4.4: Geometria do modelo numérico no PLAXIS.....	61
Figura 4.5: Tensão vertical atuante quando (a) sem furo central; (b) raio de 25 mm e (c) raio de 37,5 mm.....	63
Figura 4.6: Tensão horizontal atuante quando (a) sem furo central; (b) raio de 25 mm e (c) raio de 37,5 mm. ....	64
Figura 4.7: Contornos de deslocamentos vertical durante o “arrancamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa. ....	65
Figura 4.8: Contornos de deslocamentos horizontais durante o “arrancamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.....	66
Figura 4.9: Contornos de deslocamentos verticais durante o “carregamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa. ....	67
Figura 4.10: Contornos de deslocamentos horizontais durante o “carregamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.....	67
Figura 4.11: Foto da câmara de calibração e da tampa sem a pintura.....	70
Figura 4.12: Foto da chegada da câmara de calibração pintada e com a manta de borracha ...	71
Figura 4.13: Modelo utilizado por Jacobsen .....	72

Figura 4.14: Chuveiro em grande escala.....	73
Figura 4.15: Foto do sistema de chuva de areia no ar.....	74
Figura 4.16: Disposição dos furos da chapa .....	75
Figura 4.17: Chuveiro para deposição da areia na câmara de calibração .....	76
Figura 4.18: Fotos da estrutura de Reação .....	78
Figura 4.19: Fotos do sistema de Instalação: (a) Base da estrutura e (b) motor e o moto redutor que aplica o torque na estaca (c) estrutura montada .....	79
Figura 4.20: Desenho e foto da bolsa de reação .....	81
Figura 4.21: Compressor Pressure .....	81
Figura 4.22: Painel para controle da pressão de ar comprimido.....	82
Figura 4.23: Fotos dos big bags com areia.....	83
Figura 4.24: Partículas da areia com grãos de diâmetros heterogêneos.....	84
Figura 4.25: Curva granulométrica da areia ensaiada.....	87
Figura 4.26: Processo de moldagem por vibração .....	89
Figura 4.27: Determinação da densidade mínima.....	91
Figura 4.28: Foto do sistema de chuva de areia no ar com as alturas de queda e diâmetros pré-definidos.....	93
Figura 4.29: Resultados de peso específico da areia dentro da câmara de calibração após a primeira chuva de areia .....	95
Figura 4.30: Peso específico e a configuração final da areia dentro da câmara de calibração após a segunda chuva de areia.....	96
Figura 4.31: Peso específico e a configuração final da areia dentro da câmara de calibração após a segunda chuva de areia no ar.....	97

Figura 4.32: Envoltória de ruptura de pico.....	100
Figura 4.33: Envoltória de ruptura residual.....	100
Figura 4.34: Tensão axial normalizada x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial.....	101
Figura 4.35: Tensão desviadora x deformação axial. ....	101
Figura 4.36: Estacas com o passo de 30mm e com hélices diferentes .....	103
Figura 4.37: Estacas com o passo de 40mm e com hélices diferentes .....	104
Figura 4.38: Estacas com o passo de 50mm e com hélices diferentes .....	104
Figura 4.39: Disposição dos extensômetros e ligações dos circuitos de medição.....	106
Figura 4.40: Posição dos <i>strain gauges</i> na estaca dentro da câmara de calibração (dimensões em metros) .....	107
Figura 4.41: Estacas modelo utilizadas nos ensaios na câmara de calibração. ....	108
Figura 4.42: Disposição da peça metálica a ser usada na calibração para tração da estaca instrumentada .....	109
Figura 4.43: Desenho da peça a ser usada na calibração para torque da estaca instrumentada .....	109
Figura 4.44: Células de tensão total fabricadas .....	111
Figura 4.45: Células de pressão sendo posicionadas dentro da câmara de calibração .....	113
Figura 4.46: Localização das células de tensão na câmara de calibração (dimensões em metros) .....	114
Figura 4.47: Sistema de instalação da estaca helicoidal .....	116
Figura 4.48: Simulação do estado de tensão de campo através da bolsa de reação .....	117
Figura 4.49: Sistema de instalação da estaca helicoidal (a) Tração e (b) Compressão .....	117

Figura 4.50: Registro dos deslocamentos nos ensaios de carregamento das estacas modelo.	118
Figura 5.1: Torque x Profundidade de instalação da estaca 01.....	120
Figura 5.2: Força x Profundidade de instalação da estaca 01. ....	121
Figura 5.3: Torque x Profundidade de instalação da estaca 02.....	122
Figura 5.4: Força x Profundidade de instalação da estaca 02. ....	123
Figura 5.5: Torque x Profundidade de instalação da estaca 03.....	124
Figura 5.6: Força x Profundidade de instalação da estaca 03. ....	125
Figura 5.7: Variação das tensões radiais durante instalações das estacas01, 02 e 03 sob sobrecarga vertical de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa.....	128
Figura 5.8: Efeito da sobrecarga vertical no torque de instalação da hélice ( $T_{h\text{-medio}}$ ).....	130
Figura 5.9: Efeito da sobrecarga vertical no força vertical de instalação da hélice ( $V_{h\text{-medio}}$ ).131	
Figura 5.10: Efeito da área da hélice no torque de instalação da hélice ( $T_{h\text{-medio}}$ ). ....	131
Figura 5.11: Efeito da área da hélice na força vertical de instalação da hélice ( $V_{h\text{-medio}}$ ). ....	132
Figura 5.12: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 50 kPa. ....	135
Figura 5.13: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 100 kPa. ....	135
Figura 5.14: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 150 kPa. ....	136
Figura 5.15: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P1, com diferentes sobrecargas verticais. ....	136
Figura 5.16: Carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 50 kPa. ....	137

Figura 5.17: carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 100 kPa. .....	138
Figura 5.18: Carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 150 kPa. .....	138
Figura 5.19: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P2, com diferentes sobrecargas verticais.....	139
Figura 5.20: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 50 kPa. .....	140
Figura 5.21: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 100 kPa. .....	141
Figura 5.22: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 150 kPa. .....	141
Figura 5.23: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P3, com diferentes sobrecargas verticais.....	142
Figura 5.24: Variação das tensões radiais durante os ensaios de tração nas estacas P1, P2 e P3 sob sobrecarga vertical de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa.....	145
Figura 5.25: Efeito da sobrecarga vertical na tensão de ruptura da hélice em tração, $q_{h-T}$ .....	146
Figura 5.26: Efeito da área da hélice na carga de ruptura em tração, $Q_{h-T}$ e na tensão de ruptura da hélice em tração, $q_{h-T}$ . ....	147
Figura 5.27: Descrição das zonas de solo perturbado assumidas para três casos de razão D/d diferentes. ....	148
Figura 5.28: Relação entre $K_u$ e a razão D/d . ....	150
Figura 5.29: Efeito do ensaio de tração anterior ao ensaio de compressão. ....	153
Figura 5.30: Carga de compressão x deslocamento da estaca P1 com 50 kPa.....	154
Figura 5.31: Carga de compressão x deslocamento da estaca P1 com 150 kPa.....	155



Figura 5.32: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 50 kPa. ....	155
Figura 5.33: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 100 kPa. ....	155
Figura 5.34: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 150 kPa. ....	156
Figura 5.35: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 50 kPa. ....	156
Figura 5.36: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 100 kPa. ....	156
Figura 5.37: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 150 kPa. ....	157
Figura 5.38: Tensão de compressão x deslocamento normalizado. ....	158
Figura 5.39: Variação das tensões radiais durante os ensaios de compressão nas estacas P1, P2 e P3 sob sobrecarga vertical de 50kPa, 100 kPa e 150 kPa. ....	160
Figura 5.40: Carga de ruptura e tensão de ruptura na hélice na compressão x área da hélice e a sobrecarga vertical. ....	162
Figura 5.41: Razão $q_{h-T} / q_{h-C}$ x área da hélice. ....	164
Figura 5.42: Razão $q_{h-T} / q_{h-C}$ x sobrecarga vertical. ....	165
Figura 5.43: $K_{T-helice} \cdot D$ x sobrecarga vertical. ....	167
Figura 5.44: $K_{T-helice} \cdot D$ x área da hélice. ....	167
Figura 5.45: $K_{T-helice} \cdot D \cdot (p/D)$ x área da hélice. ....	168

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Câmaras de calibração existentes no mundo .....	36
Tabela 3.2: Efeitos do transporte de sedimentação .....	47
Tabela 3.3: Faixas de Compacidade relativa obtidas a partir dos métodos de preparação de amostras .....	48
Tabela 3.4: Uniformidade de distribuição da compacidade relativa (%) ao longo da altura da amostra .....	49
Tabela 3.5: Repetibilidade de determinação da compacidade relativa (CR) em vários métodos .....	50
Tabela 3.6: Casos estudados .....	53
Tabela 4.1: Parâmetros da areia tipo Hostun .....	55
Tabela 4.2: Parâmetros usados na simulação dos ensaios triaxiais .....	57
Tabela 4.3: Propriedades da estaca helicoidal (Aço).....	58
Tabela 4.4: Propriedades do solo intacto.....	58
Tabela 4.5: Propriedades do solo perturbado .....	59
Tabela 4.6: Características do cilindro utilizado .....	89
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios para determinar o $e_{min}$ .....	90
Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de densidade mínima. ....	91
Tabela 4.9: Informações sobre o cilindro. ....	94
Tabela 4.10: Resumo dos Parâmetros .....	99
Tabela 4.11: Parâmetros de ruptura e módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio triaxial ...	100
Tabela 4.12: Propriedades geométricas das estacas helicoidais fabricadas.....	105
Tabela 4.13: Constantes de calibração das células de tensão total .....	110

Tabela 4.14: Propriedades geométricas das estacas helicoidais ensaiadas .....	112
Tabela 5.1: Resultados de instalação das estacas nos ensaios T1 a T9.....	127
Tabela 5.2: Razão da hélice e do passo com o diâmetro do fuste.....	133
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de tração .....	144
Tabela 5.4: Comparação entre valores medidos e calculados de capacidade de carga da hélice em tração, $Q_{h-T}$ .....	149
Tabela 5.5: Comparação entre valores medidos e calculados (com o ajuste de $K_u$ ) de capacidade de carga da hélice em tração, $Q_{h-T}$ .....	151
Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de compressão T1 a T9. ....	159
Tabela 5.7: Relação entre tensões de ruptura da hélice em tração ( $q_{h-T}$ ) e em compressão ( $q_{h-C}$ ), .....	163
Tabela 5.8: Resultados de $K_T$ -hélice (fator de torque relativo a hélice) .....	166

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
3.1 ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS .....	12
3.1.1 Terminologia .....	12
3.1.2 Histórico .....	12
3.1.3 Características.....	15
3.1.4 Vantagens .....	17
3.1.5 Instalação .....	18
3.2 MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HELICOIDAIS.....	21
3.2.1 Considerações iniciais .....	21
3.2.2 Capacidade de carga à tração x compressão.....	22
3.2.3 Estacas de hélice única (profundas) .....	22
3.2.3.1 Capacidade de carga à tração .....	22
3.2.3.2 Capacidade de carga à compressão.....	24
3.2.4 Método para estacas multi-hélices (profundas).....	25
3.2.4.1 Método de capacidades individuais .....	25
3.2.4.2 Método de ruptura cilíndrica.....	27
3.2.5 Resistência por adesão ou atrito na haste da estaca .....	30
3.2.6 Deslocamento vertical à tração da fundação por estaca helicoidal.....	30

3.3	RELAÇÃO TORQUE-CAPACIDADE DE CARGA .....	31
3.4	EFEITO DE INSTALAÇÃO NA CAPACIDADE DE CARGA AXIAL DAS ESTACAS HELICOIDAIS .....	33
3.5	ENSAIOS EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO.....	35
3.5.1	Considerações iniciais .....	35
3.5.2	Breve histórico.....	36
3.5.3	Condições de contorno e o efeito das dimensões da câmara de calibração.....	37
3.5.4	Principais técnicas de preparação de amostras de areia .....	40
3.5.4.1	Considerações iniciais .....	40
3.5.4.2	Chuva de areia.....	40
3.5.4.3	Chuva de areia na água ou sedimentação .....	41
3.5.4.4	Compactação com o uso de soquete .....	42
3.5.4.5	Compactação com o uso de um vibrador .....	42
3.5.4.6	Influência do método de preparação sobre os resultados dos ensaios .....	43
3.5.4.6.1	Arranjo dos grãos (“Fabric”) .....	44
3.5.4.6.2	Tensões no solo durante a moldagem .....	45
3.5.5	Simulações das condições de campo x métodos de preparação dos corpos de prova .....	45
3.5.5.1	Considerações iniciais .....	45
3.5.5.2	Solos sedimentares .....	46
3.5.5.3	Solos com “Fabric” artificiais.....	48
3.5.6	Limitações e vantagens dos métodos de preparação de amostras.....	48

3.5.6.1 Intervalos de valores de compacidade relativa .....	48
3.5.6.2 Uniformidades .....	49
3.5.6.3 Reprodutibilidade .....	49
3.5.6.4 Mineralogia .....	50
3.5.6.5 Granulometria.....	50
3.5.7 Estacas helicoidais em câmara de calibração .....	51
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2 MODELAGEM NUMÉRICA PARA DEFINIÇÕES DAS DIMENSÕES DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO .....	54
4.2.1 Considerações iniciais .....	54
4.2.2 Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem numérica .....	54
4.2.2.1 Solo de preenchimento – Areia seca do tipo Hostun (HN38).....	54
4.2.2.2 Calibração do modelo por meio da simulação numérica dos ensaios triaxiais.....	55
4.2.2.3 Propriedades dos materiais e modelo constitutivo.....	57
4.2.3 Estudo numérico da estaca helicoidal de única hélice instalada em areia .....	60
4.2.3.1 Geometria do modelo.....	60
4.2.3.2 Análise numérica .....	61
4.2.4 Considerações iniciais dos resultados e análises.....	62
4.2.4.1 Influência do furo central da membrana.....	63

4.2.4.2 Comportamento carga-deslocamento nos ensaios de carregamento, considerando-se o efeito de instalação da estaca e a influência do tamanho da câmara .....	65
4.2.4.3. Conclusões sobre os resultados numéricos: .....	68
4.3 MONTAGEM DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO .....	68
4.3.1 Considerações iniciais .....	68
4.3.2 Câmara de calibração .....	69
4.3.2.1 Considerações iniciais .....	69
4.3.2.2 Fabricação do tanque de aço .....	70
4.3.3 Sistema de deposição de areia através da “chuva de areia” (“Chuveiro”) .....	71
4.3.3.1 Considerações Iniciais .....	71
4.3.3.2 Dimensionamento do Chuveiro .....	73
4.3.3.3 Construção do “chuveiro” e seu funcionamento .....	75
4.3.4 Sistema de instalação da estaca e a estrutura de reação .....	77
4.3.5. Sistema para aquisição de dados .....	80
4.3.6. Acessórios diversos .....	80
4.3.6.1. Considerações iniciais .....	80
4.3.6.2. Bolsa de reação .....	80
4.3.6.3 Sistema de aplicação de ar comprimido e acessórios.....	81
4.3.6.4 <i>Big Bags</i> para Armazenamento da Areia .....	82
4.4 AREIA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO .....	83
4.4.1 Descrição das partículas: Mineralogia e formato dos grãos .....	83

4.4.2 Propriedades.....	84
4.4.2.1 Densidade real dos grãos ( $G_s$ ).....	84
4.4.2.2 Granulometria.....	86
4.4.2.3 Índice de vazios máximo e mínimo.....	87
4.4.2.3.1 Considerações iniciais .....	87
4.4.2.3.2 Índice de vazios mínimo segundo a ABNT.....	88
4.4.2.3.3 Índice de vazios máximo segundo a ABNT .....	90
4.4.2.3.4 Índice de vazios segundo o método da chuva de areia em laboratório .....	92
4.4.2.3.5.Índices de vazios encontrados na câmara de calibração .....	94
4.4.3 Ensaio Triaxiais CID.....	98
4.4.4 Resultados e análises da areia .....	98
4.4.5 Comentários sobre os resultados dos ensaios .....	101
4.5 ESTACAS MODELO .....	102
4.5.1 Considerações iniciais .....	102
4.5.2 Fabricação das estacas.....	102
4.5.3 Instrumentação das estacas helicoidais .....	105
4.5.4 Calibração da instrumentação (Tração e Torque) .....	108
4.6 CÉLULAS DE TENSÃO USADAS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO .....	109
4.6.1 Considerações iniciais .....	109
4.6.2 Fabricação das células de tensão total .....	110
4.6.3. Calibração das células de tensão total .....	111
4.7 ENSAIOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO.....	111
4.7.1 Considerações iniciais .....	111



4.7.2 Execução dos Ensaios .....	112
<b>5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>119</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	119
5.2 ENSAIOS REALIZADOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO .....	119
5.2.1. Considerações iniciais .....	119
5.2.2 Instalação das estacas helicoidais .....	119
5.2.2.1 Resultados medidos nas estacas na instalação.....	119
5.2.2.2 Resultados medidos no solo na instalação .....	127
5.2.2.3 Análise dos resultados de instalação .....	129
5.2.3 Ensaios de tração.....	134
5.2.3.1 Resultados medidos nas estacas nos ensaios de tração.....	134
5.2.3.2 Resultados medidos no solo nos ensaios de tração .....	144
5.2.3.3 Análise dos resultados dos ensaios de tração.....	146
5.2.4 Ensaio de Compressão .....	152
5.2.4.1 Resultados medidos nas estacas nos ensaios de compressão.....	152
5.2.4.2 Resultados medidos no solo nos ensaios de compressão .....	159
5.2.4.3 Análise dos resultados dos ensaios de compressão .....	161
5.2.5 Análise da relação entre capacidade de carga a tração e a compressão .....	162
5.2.6 Análise do fator de torque das hélices ( $K_T$ –hélice) .....	165
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>168</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	168

6.1.1 Conclusões sobre a construção da câmara de calibração .....	168
6.1.2 Conclusões dos ensaios realizados na câmara de calibração .....	169
6.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....	170
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>172</b>
<b>APÊNDICE A – Procedimento para aplicação dos extensômetros .....</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório .....</b>	<b>187</b>
<b>APÊNDICE C – Calibração das estacas helicoidais .....</b>	<b>247</b>
<b>APÊNDICE D – Procedimento para montagem do “chuveiro”, execução da chuva de areia e fechamento da tampa. ....</b>	<b>264</b>
<b>APÊNDICE E – Procedimento para execução dos ensaios triaxiais. ....</b>	<b>270</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As estacas helicoidais são formadas por um tubo de aço em que são soldadas uma ou mais hélices (placas helicoidais), cujas as dimensões e quantidades variam de acordo com a necessidade de capacidade de carga definida em projeto. O diâmetro do tubo central costuma variar entre 73 e 965 mm, e o diâmetro das hélices entre 152 e 1219 mm (Sakr, 2009). Essas estacas são instaladas no terreno pela aplicação de torque e força vertical simultânea para garantir um avanço no solo igual a um passo de hélice por rotação. O torque final da instalação é medido durante a execução para fins de controle de qualidade, pois pode ser correlacionado empiricamente e teoricamente com a capacidade de carga da fundação.

Esse tipo de fundação normalmente é usado para suportar esforços de tração e compressão em torres de linhas de transmissão, torres eólicas, painéis solares e outros tipos de estruturas de peso leve a médio. No entanto, com o avanço dos equipamentos de instalação, estacas helicoidais de grande diâmetro estão sendo usadas como fundações de edifícios comerciais e residenciais, e para suportar equipamentos pesados em obras industriais (Elsawy et al. 2019).

Mais recentemente, essas estacas têm sido sugeridas como uma solução vantajosa para fundações de obras offshore (Byrne e Houlsby 2015), principalmente devido à grande capacidade à tração proporcionada pelo efeito âncora da hélice (Spagnoli e Gavin, 2015) e devido à baixa poluição sonora durante a instalação em comparação com as estacas cravadas (Cerfontaine et al. 2019; Lesny e Uchtmann 2019).

No Brasil, as grandes extensões das linhas de transmissão de energia elétrica implicam na necessidade de soluções para as fundações das torres em diversos cenários geotécnicos, que considerem a dificuldade de acesso e de recursos locais. Por esta razão, as estacas helicoidais tem sido frequentemente empregadas como fundações e ancoragens de torres no país, principalmente por: (i) suportar esforços de tração e compressão, (ii) ser instalada por equipamento de grande mobilidade, (iii) facilidade de transporte, (iv) capacidade de carga controlada pela medida do torque final de instalação, (v) pode ser instalada abaixo do N.A., (vi) possibilidade de instalação inclinada, (vii) evita serviços de escavação, forma e concretagem, (viii) pode ser carregada imediatamente após o final da execução (Santos Filho, 2019).

Embora o uso de fundações por estacas helicoidais tenha aumentado nas últimas décadas, o nível atual de entendimento sobre o comportamento destas fundações ainda é insatisfatório (Merifield 2011; Wang et al. 2013). Como citado em Gavin *et al.* (2014), os

modelos empíricos e teóricos para estimar a capacidade axial de estacas helicoidais ainda não estão bem estabelecidos, e há uma enorme variação em parâmetros de entrada recomendados para tais modelos.

As divergências entre os resultados previstos e medidos da capacidade à tração de estacas helicoidais ocorrem principalmente devido à perturbação no solo causada pelo processo de instalação (Pérez *et al.*, 2018). Wilson (1950) observou que o volume cilíndrico de solo acima da placa helicoidal, que se estende a um raio igual ao raio da placa, é mais ou menos amolgado pelo processo de instalação, e esse efeito varia de acordo com o tipo de solo. Os efeitos da instalação no comportamento de fundações helicoidais submetidas a tração variam com o tipo de solo e a geometria da estaca, conforme observado em investigações anteriores (Weech e Howie 2001, Tsuha *et al.* 2012a, Lutenegger *et al.* 2014; Lutenegger e Tsuha 2015; Tsuha *et al.* 2016; Pérez *et al.*, 2018; Sharif *et al.* 2019). No entanto ainda são necessários novos estudos para entender estes efeitos em diferentes solos e configurações de estacas.

A previsão do torque de instalação e da força vertical necessária para instalar esse tipo de estaca também é um aspecto importante a ser esclarecido em estudos futuros. A capacidade de carga destas estacas é diretamente correlacionada com o torque final da instalação por meio de um fator empírico de torque,  $K_T$  (Hoyt e Clemence 1989). Deste modo, uma estimativa acurada do torque de instalação da estaca seria importante para prever a sua capacidade de carga. Além disso, Byrne e Houlsby (2015) comentam que para estacas helicoidais de grandes dimensões para aplicação em obras offshore, é necessário um cálculo robusto do torque de instalação para a definição de equipamento de instalação adequado. Para este caso de aplicação, é essencial conhecer as características geométricas da estaca que podem ser controladas para minimizar as forças de instalação (Spagnoli e Tsuha, 2020).

Nos ensaios de fundações *in situ*, as condições do solo normalmente não são controladas, impedindo a avaliação dos efeitos de alguns parâmetros no problema investigado. Além disso, a instrumentação das estacas e do solo muitas vezes não é viável em estudos de campo, e apenas modelos físicos em laboratório são capazes de explorar completamente alguns aspectos da interação estaca-solo.

As primeiras pesquisas sobre estacas helicoidais foram baseadas em ensaios em modelos reduzidos testados a 1g (Clemence e Pepe 1984; Mooney *et al.* 1985; Narasimha Rao *et al.* 1989; Ghaly *et al.* 1991). Devido a algumas limitações dessa técnica (problemas dependentes das tensões confinantes, por exemplo), esse tipo de fundação também foi estudado por diferentes autores usando modelagem física em centrifuga (Levesque 2002, Tsuha 2007, Bian *et al.* 2008, Wang *et al.* 2010, Schiavon *et al.* 2017, Al-Baghdadi 2018)

Ensaio em câmara de calibração é um outro tipo de técnica experimental usada para testes em modelos em escala reduzida, nos quais a condição de confinamento de campo pode ser reproduzida em laboratório. Foray (1991) comenta que essa técnica de modelagem física pode ser usada para estudar problemas axissimétricos geotécnicos que envolvem um alto nível de tensão, como estacas longas usadas em obras offshore, ancoragens, etc. Para esses ensaios, amostras homogêneas de solo podem ser preparadas sob diferentes condições de contorno controladas. Essa técnica permite o uso de amostras de areia submetidas a tensões de confinamento conhecidas e controladas, semelhantes às de campo.

Os ensaios em câmaras de calibração tem sido usados no desenvolvimento de correlações entre resultados de ensaios de investigação *in situ* e diferentes parâmetros do solo, e também em estudos sobre o de comportamento de fundações (Paik e Salgado 2003, Brown *et al.* 2004, Tsuha *et al.* 2012b, Bekki *et al.* 2013, e outros).

Diante do cenário descrito, o objetivo deste estudo foi investigar experimentalmente o comportamento de fundações por estacas helicoidais em areia compacta através de ensaios em câmara de calibração, para um melhor entendimento do mecanismo de interação solo-estaca, tanto na fase de instalação, quanto na de fase carregamento. Os ensaios em estacas helicoidais em câmara de calibração podem reproduzir a capacidade de carga da hélice da estaca a uma profundidade específica no campo, e a resistência por atrito lateral em pequeno comprimento de fuste logo acima da hélice.

Para esta pesquisa, foi necessário construir uma câmara de calibração para a realização de ensaios em estacas helicoidais com diferentes geometrias, evitando-se os efeitos da variabilidade natural do solo nos resultados, como ocorre em investigações de fundações em campo. Este estudo é importante para a geotecnia brasileira, visto que no Brasil um grande número de linhas de transmissão de energia tem sido construído em torres estaiadas e autoportantes suportadas por fundações em estacas helicoidais.

## 2. OBJETIVOS

Esta tese de doutorado tem como objetivos principais:

- Construir uma câmara de calibração que proporcione a realização de pesquisas (além da presente tese) em que possa ser reproduzido e estudado o comportamento de fundações nas condições de tensões de confinamento de campo.
- Estudar os efeitos da área da hélice e das tensões de sobrecarga no torque de instalação de estacas helicoidais e na força vertical necessária para manter o avanço no solo igual a um passo por volta durante a instalação.
- Estudar os efeitos da área da hélice e das tensões de sobrecarga na capacidade de carga à tração e na capacidade de carga à compressão deste tipo de fundação.
- Avaliar o efeito de instalação da estaca no comportamento carga-recalque e na capacidade de carga da fundação.
- Estudar a relação entre o torque de instalação e a capacidade de carga de fundações por estacas helicoidais em areia.
- Avaliar a relação entre capacidade de carga à tração e a capacidade de carga à compressão para as diferentes configurações de estaca e condições de solo e tensões de sobrecarga testadas.
- Compreender a variação das tensões no solo em torno de uma estaca helicoidal durante a instalação e durante o carregamento, com o auxílio de pequenos sensores de tensão instalados no solo preparado sob condições controladas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESTACAS METÁLICAS HELICOIDAIS

##### 3.1.1 Terminologia

Para evitar confusões quanto à terminologia sobre o tema, com base na literatura o autor utiliza o termo “ancoragem helicoidal” para referenciar as fundações por estacas helicoidais submetidas somente à tração, e “estaca helicoidal” quando a fundação é submetida à tração e à compressão.

##### 3.1.2 Histórico

Segundo Perko (2009), o primeiro registro sobre o uso de estacas helicoidais foi em 1836, pelo engenheiro civil Alexander Mitchell. Na época, um dos problemas que intrigaram Mitchell foi como construir estruturas marinhas em solos fracos, como arrecifes de areia, argilas moles e bancos de estuários do rio. Aos 52 anos, Mitchell inventou a estaca helicoidal como uma solução para este problema. O primeiro uso mais conhecido foi em 1838, quando Mitchell utilizou as estacas helicoidais na fundação do Farol de Maplin Sands (Figura 3.1), construído no rio Tâmbisa, na Inglaterra. As hastes das primeiras estacas eram confeccionadas de ferro ou madeira com hélices de ferro.

Durante a expansão do Império Britânico, as estacas helicoidais foram usadas para suportar novas pontes em muitos países e em diferentes continentes. Os artigos técnicos descrevendo como as pontes eram suportadas pelas estacas helicoidais foram publicados no *The Engineering and Building Record* em 1890 e no *Engineering News*, em 1892. As estacas helicoidais eram instaladas em grupos e ocasionalmente inclinadas.

Como resultado da expansão britânica, estacas helicoidais foram sendo aplicadas em todo o mundo. As fotografias de três cais, o de Eastbourne, Bournemouth e o do Palácio, suportados por estacas helicoidais, são mostrados na Figura 3.2. Como pode ser visto na figura, cada cais consistiu em uma série de colunas interligadas. Cada uma dessas colunas foi suportada por uma estaca helicoidal. Estas fundações tinham que suportar forças de maré, cargas de vento e fluxos de gelo ocasionais.

Figura 3.1: Farol de Maplin Sands



Fonte: PERKO, 2009.

Entre as décadas de 1850 e de 1890, mais de 100 faróis foram construídos suportados por estacas helicoidais ao longo da costa leste dos Estados Unidos, e ao longo do Golfo do México. Muitas destas fundações foram submetidas às cargas laterais dos fluxos de gelo, e comportavam-se consideravelmente melhor do que outras fundações. A maioria dos faróis históricos foi destruída ou desmontada (PERKO, 2009).

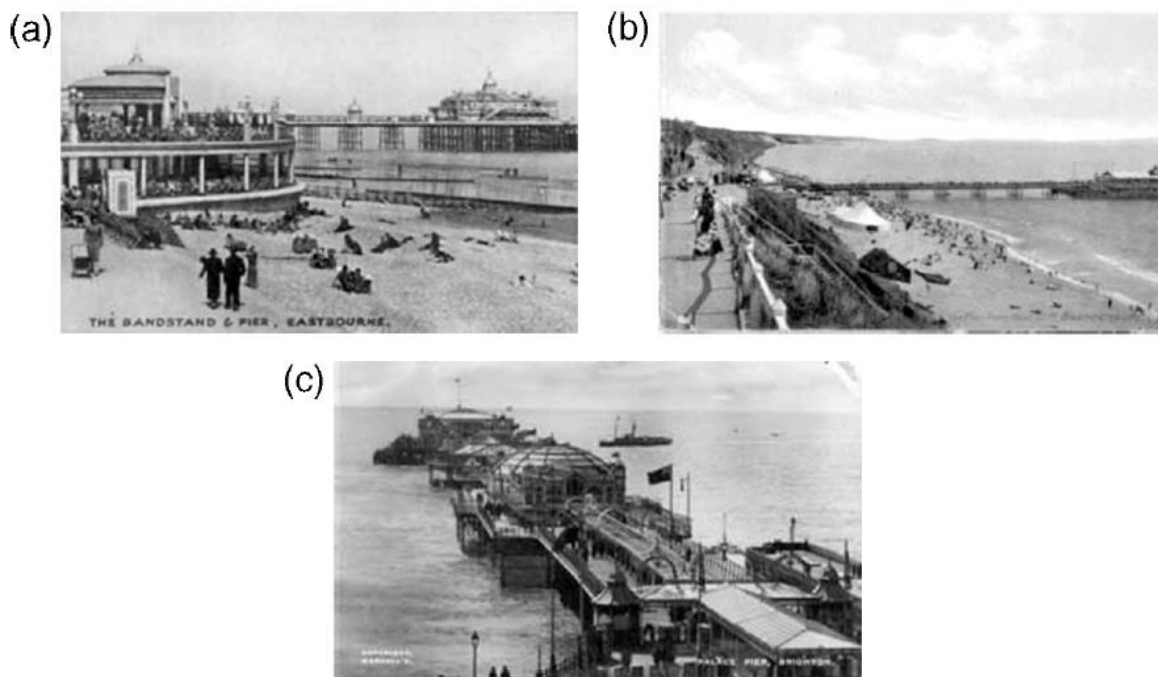
Entre 1900 e 1950, o uso de estacas helicoidais foi reduzido. Durante este período, houve grande desenvolvimento de equipamentos mecânicos para execução de estacas e perfuração. Foram desenvolvidas fundações profundas, como fundações perfuradas de Raymond e estacas Franki. Segundo Clemence (1985), na década de 1950 ocorreu um desenvolvimento significativo das estacas helicoidais. Com o desenvolvimento de motores de torque hidráulicos modernos, avanços na fabricação e novas técnicas de galvanização, a estaca



helicoidal moderna evoluiu principalmente para aplicações de ancoragens até cerca de 1980, quando o engenheiro Stan Rupiper projetou o primeiro caso de estacas para aplicação de compressão nos EUA usando estacas helicoidais modernas.

Este tipo de fundação teve seu uso inicialmente na indústria da energia elétrica e telecomunicações, devido às suas vantagens (rápida instalação, capacidade de carregamento imediato e resistência à tração e à compressão). Nos últimos anos passaram a ser utilizadas como fundações de diversos tipos de estruturas, construções de residências, ancoragens e contenções de terra (MERIFIELD, 2011). No entanto, o uso desta estaca tem sido de certa forma limitado devido à falta de conhecimento do seu comportamento, sendo o dimensionamento baseado em regras empíricas e recomendações de fabricantes (TSUHA, 2007).

Figura 3.2: Piers apoiados por estacas helicoidais:(a) Eastbourne; (b) Bournemouth; (c) Palace



Fonte: PERKO, 2009.

A utilização de fundações em estacas helicoidais teve início no Brasil no final do século XX. Sua utilização, a princípio, se deu em linhas de transmissão de energia e de telecomunicações, para resistir principalmente a esforços de tração (TSUHA, 2007). Nas obras de transmissão de energia no país, as estacas helicoidais são usadas como ancoragem dos estais (torres estaiada) e fundações para torres autoportantes de transmissão.

No exterior as estacas helicoidais são usadas como fundações de deques e galpões, além de reforço de fundações existentes. Equipamentos de instalação pequenos e manobráveis e baixo custo de mobilização fazem as estacas helicoidais ideais para locais com acesso limitado,

como lotes estreitos e dentro de construções existentes. O leve e baixo impacto do equipamento de instalação tornou as estacas helicoidais uma alternativa atraente em zonas sensíveis ao meio ambiente. Muitos quilômetros de trilhas em parques ecológicos nos Estados Unidos foram apoiados em estacas helicoidais. As trilhas ecológicas podem ser construídas usando equipamentos de instalação de estacas helicoidais apoiados em passarelas, de modo que o equipamento não perturbe as áreas naturais sensíveis. Além disso, a capacidade de instalar estacas helicoidais sem problemas de vibração resultou em seu uso popular dentro de edifícios existentes e em áreas urbanizadas.

### 3.1.3 Características

As estacas helicoidais são fundações de aço que são “aparafusadas” no terreno para suportar estruturas. Como encontrado em várias referências bibliográficas, o elemento estrutural de fundação é constituído por uma haste central onde são soldadas placas em forma de helicoides, com determinados espaçamentos entre elas. Kurian e Shah (2009) comentam que normalmente o diâmetro das hélices varia tipicamente entre duas e quatro vezes o diâmetro da haste. Segundo Tsuha (2007), a definição do diâmetro e do número de hélices de uma estaca vai depender das características do solo e da capacidade desejada. O espaçamento entre as hélices é geralmente igual a 3 vezes o diâmetro da hélice inferior, definido de forma a se obter a máxima eficiência. Conforme apresentado por Carvalho (2007), a Figura 3.3 apresenta uma série de hélices e o processo de soldagem da hélice da ponta na haste central de uma estaca.

Figura 3.3: (a) Hélices recém formadas, (b) Soldagem de uma hélice à haste central de uma estaca



(a)



(b)

Fonte: CARVALHO, 2007.

A estaca helicoidal é constituída por 2 componentes básicos: a seção guia e suas extensões (com ou sem hélices). A seção guia é a primeira seção instalada no solo, é nela onde estão fixadas as hélices. As extensões são hastes lisas com sistema de acoplamento com parafusos (ou roscas) que são acrescentadas à seção guia. As extensões são adicionadas à estaca até que se alcance uma profundidade suficiente para atender à capacidade de carga definida em projeto (PERKO, 2009). As seções de extensão podem ter hélices adicionais ou serem constituídas apenas por uma haste tubular lisa. A Figura 3.4 apresenta uma ligação entre seções de uma estaca. Os acoplamentos geralmente consistem em “luvas” macho e fêmea “aparafusadas”.

Figura 3.4: Detalhe da ligação parafusada entre seções de uma estaca helicoidal.



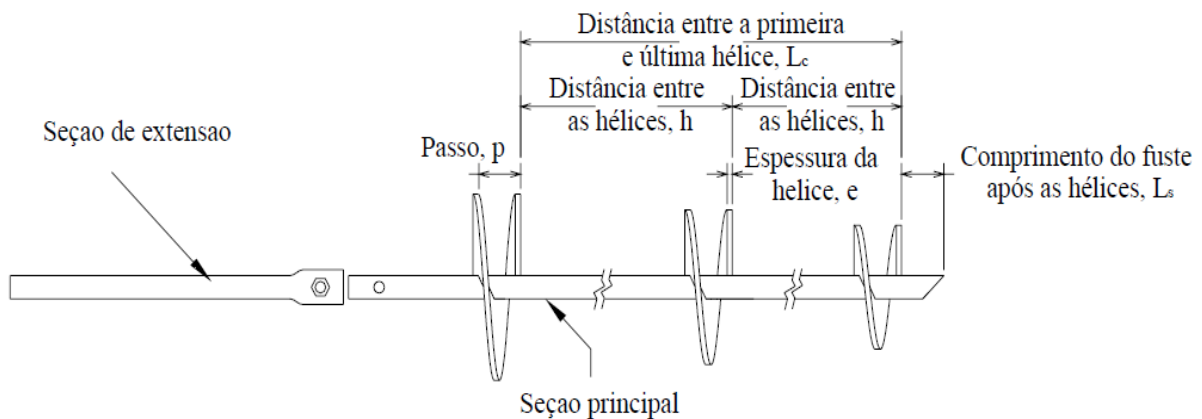
Fonte: Santos Filho, 2014.

Carvalho (2007) apresenta a Figura 3.5, que mostra uma seção guia com as denominações de suas características básicas. Ainda segundo o autor, a haste central pode ser constituída por uma seção circular vazada ou quadrada maciça, tendo a função de transferir o torque durante a instalação, e as forças axiais às hélices quando a estaca é carregada. As hélices são fabricadas com passo constante para uma mesma estaca, de forma a causar a menor perturbação possível no solo durante sua instalação.

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

Segundo Santos Filho (2014), como no Brasil ainda não há norma específica que trata da fabricação de estacas helicoidais, sendo cada modelo fabricado de acordo com as características específicas dos projetos. Tem-se como premissa básica que a resistência dos elementos deve ser compatível com os esforços gerados durante o processo de instalação e quando submetidos ao carregamento de serviço, levando-se em conta a diminuição das espessuras devido a corrosão.

Figura 3.5: Estaca metálica helicoidal com indicação de suas características básicas



Fonte: CARVALHO, 2007

#### 3.1.4 Vantagens

De acordo com Perko (2009), as estacas helicoidais oferecem algumas vantagens quando comparadas a outros tipos de fundação. As estacas helicoidais são práticas, versáteis e econômicas. As estacas helicoidais são uma excelente adição à variedade de alternativas de fundação profunda disponíveis para o construtor. Algumas vantagens das estacas helicoidais apresentadas por Perko (2009) são as seguintes:

- i. Resistência à erosão e correntes para aplicações em pontes;
- ii. Podem ser removidas em aplicações temporárias;
- iii. São facilmente transportadas para locais remotos;
- iv. O torque de instalação é usado para verificação da capacidade de carga;
- v. Podem ser instaladas abaixo nível d'água sem necessidade de rebaixamento;
- vi. Rápida instalação;
- vii. Podem ser instaladas inclinadas para resistir esforços horizontais na fundação;
- viii. Podem ser instaladas com pequenos equipamentos em locais com restrições;

- ix. Baixo ruído e mínima vibração durante a instalação;
- x. Dispensa serviços de fôrmas e concretagens;
- xi. Não produz bota-fora em canteiros de obra;
- xii. Minimiza perturbações em locais ambientalmente sensíveis;
- xiii. Diminui o número de viagens de caminhões na obra.

Mesmo com esta lista de vantagens acima, há algumas restrições quanto ao emprego de estacas helicoidais. Carvalho (2007) explica que solos com características que possam danificar as estacas metálicas ou mesmo que causem impedimento da instalação a uma profundidade adequada para resistir a esforços de tração são restritivos. Dentro destes solos, inclui os solos com grande quantidade de pedregulhos e matacões. Outra desvantagem é a possível flambagem da haste central em estacas instaladas em espessas camadas de solos moles ou pouco compactos.

Stephenson (2002) comenta que estacas helicoidais não são eficazes quando aplicadas em estruturas que solicitem as fundações com elevados carregamentos horizontais e/ou momentos fletores. Nestes casos, o diâmetro da seção superior da estaca é aumentado por meio de grauteamento da haste, para eliminar a possibilidade de flambagem.

### 3.1.5 Instalação

A Figura 3.6 apresenta um exemplo de equipamento de instalação de estacas. O topo da haste da estaca helicoidal é “aparafusado” no terreno por aplicação de torque usando-se um motor hidráulico acoplado a uma retroescavadeira, caminhão Munck ou outra máquina hidráulica. Para manter o avanço da estaca no solo igual a um passo de hélice por rotação, é aplicada simultaneamente ao torque uma pequena força vertical. Infelizmente, as construtoras não conseguem garantir/controlar o avanço da estaca a um passo por rotação.

Antes de iniciar a instalação, há de se conectar a seção guia ao motor de torque hidráulico utilizando um cabeçote de acoplamento e pinos. Em seguida, a estaca é posicionada no local e alinhada com a inclinação definida. É aplicada uma leve força vertical para penetração da ponta da estaca no solo e, após a conferência da inclinação ou verticalidade da estaca, a rotação é iniciada.

A. B. Chance Co. (2010) recomenda que a velocidade de rotação seja da ordem de 5 a 20 rpm. Segundo Perko (2009), a velocidade de instalação da estaca no solo não pode ser superior a 30 rpm. Na medida em que a penetração da estaca avança no terreno, as extensões são adicionadas. A instalação da estaca continua até que o torque e a profundidade mínimos

especificados no projeto sejam obtidos (A.B. CHANCE CO., 2003). O torque de instalação é acompanhado por meio de um torquímetro acoplado a composição do equipamento de instalação (Figura 3.7).

Figura 3.6: Equipamento de instalação de estacas helicoidais

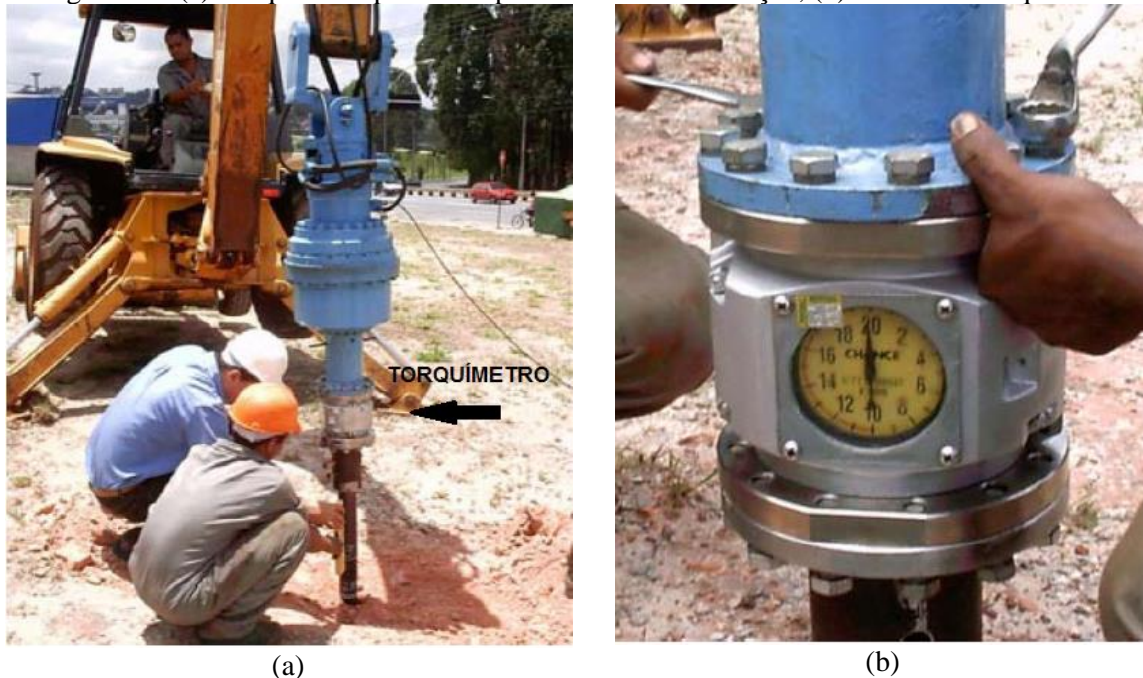


Fonte: Santos Filho (2019).

Os motores de torque comumente usados para instalação de estacas helicoidais produzem um torque de 6 a 100 kN.m ou superior. O motor de torque deve ter capacidade de rotação no sentido horário e anti-horário e deve ser ajustável em relação às taxas de rotação durante a instalação. Diferentes máquinas hidráulicas podem ser usadas para a aplicação de torque na estaca. Os motores de torque geralmente têm uma velocidade de fluxo hidráulico mínimo e não podem ser executados a partir de energia elétrica. Em geral, quanto maior a taxa

de fluxo hidráulico, mais rápido o motor gira. As taxas de rotação típicas estão entre 10 e 30 rpm.

Figura 3.7: (a) Torquímetro para acompanhamento da instalação, (b) detalhe do torquímetro



Fonte: TSUHA, 2007.

Perko (2009) sugere que, no início da instalação, durante a rotação da estaca, uma pequena força axial deve ser aplicada para manter o avanço da estaca no terreno, o mais próximo possível de um passo por rotação. Caso esta força seja insuficiente, isto pode resultar em avanço menor que o passo e provocar efeito de tradagem, afetando o solo atravessado. Isto irá prejudicar a capacidade de carga à tração da estaca helicoidal. Como escrito anteriormente, esse controle sugerido por Perko (2009) é muito difícil na prática, o que acaba sendo uma desvantagem da estaca helicoidal, já que não é garantido que as estacas não sofram o efeito de tradagem.

De acordo com diversos pesquisadores (Hoyt e Clemence, 1989; Narasimha Rao *et al.*, 1989; Ghaly *et al.*, 1991; Ghaly e Hanna, 1991; Perko, 2000; Tsuha, 2007; Tsuha e Aoki, 2010), a capacidade de carga da estaca à tração ( $Q_U$ ) pode ser correlacionada, empiricamente, com o torque final de instalação ( $T$ ) por meio de uma relação linear, mostrada na equação 3.1.

$$Q_U = K_T \cdot T \quad 3.1$$

Sendo o  $K_T$  uma constante empírica que depende da geometria da estaca helicoidal.

O valor de torque é uma medida indireta da resistência do solo que é atravessado pelas hélices. Deste modo, quando se atinge o valor de torque definido em projeto, por meio da correlação da equação 3.1, a penetração da estaca no terreno é paralisada. Este procedimento de controle de execução de estacas helicoidais é equivalente ao controle dos registros de carga em estacas cravadas. No entanto, a verificação do torque definido em projeto é usado como um método de controle e não de previsão da capacidade de carga, pois não tem como ser medido na fase de projeto, anterior à instalação.

## 3.2 MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HELICOIDAIS

### 3.2.1 Considerações iniciais

Os métodos usuais para prever a capacidade de carga de fundações por estacas helicoidais são normalmente agrupados de acordo com a profundidade das hélices superior (estacas profundas ou rasas) e com o número de hélices (hélice única e multi-hélices). Existem muitos métodos que podem ser usados para estacas helicoidais de uma haste, porém, será apresentado nesta tese os métodos mais difundido no meio geotécnico brasileiro para o cálculo de capacidade de carga de estacas helicoidais.

A separação entre estacas profundas e rasas ocorre devido aos diferentes mecanismos de ruptura destas estacas quando submetidas à tração. Quando são estacas rasas, a superfície de ruptura atinge o nível do terreno, e quando profundas, a superfície de ruptura se concentra na região de solo logo acima da hélice. Segundo Das e Shukla (2013) as estacas são consideradas "profundas" quando a placa helicoidal (ou hélice superior, no caso de estacas com várias hélices) é instalada em profundidade relativa  $H/D$  ( $D$  é o diâmetro da hélice e  $H$  é a profundidade de instalação da hélice) maior que um determinado valor crítico. Trofimenkov e Maruipolshii (1965) mostraram que o valor crítico varia entre  $4D$  e  $5D$  em solos argilosos e de  $5D$  a  $6D$  em areia.

Este estudo é focado em estacas helicoidais profundas, que são as usadas no Brasil, e o tipo mais usado em outros países. Portanto, nesta revisão não são apresentados os métodos para estacas helicoidais rasas.



### 3.2.2 Capacidade de carga à tração x compressão

Este tipo de fundação tem sido usada para resistir a esforços de tração e de compressão. Os resultados de provas de carga nessas estacas mostram que a razão entre capacidade de carga à tração e à compressão é normalmente inferior a 1 (Trofimenkov e Mariupolskii 1965; Sakr 2009; Gavin *et al.* 2014; Lutenegger e Tsuha 2015). Essa diferença é causada devido à perturbação do solo acima das hélices causada durante a instalação, que varia com o número de hélices, configuração das hélices e tipo de solo. Por esta razão, a capacidade à tração é mais variável e difícil de se prever comparado com à capacidade a compressão, visto que o solo que suporta o carregamento em tração é o solo acima das hélices, que foi perturbado pela instalação (Spagnoli e Tsuha, 2019).

No caso de fundações helicoidais sob compressão, alguns estudos (Kanai 2007, Tsuha *et al.* 2015) mostram que a capacidade de carga é controlada praticamente pela resistência do solo praticamente intacto abaixo da hélice inferior. Bagheri e El Naggar (2015) observaram experimentalmente que o efeito da instalação é insignificante abaixo da hélice inferior.

### 3.2.3 Estacas de hélice única (profundas)

#### 3.2.3.1 Capacidade de carga à tração

A equação geral da capacidade de carga de Terzaghi tem sido usada por profissionais para avaliar a capacidade de carga de estacas de hélice única e com várias hélices. O manual técnico da Chance (Hubbell, Inc 2014) apresenta equações para estimar a capacidade de carga de estacas de hélice única (profunda), usando a equação de Terzaghi, ignorando o termo “ $0,5\gamma'BN\gamma$ ” porque o placa helicoidal é pequena. O uso do modelo de Terzaghi deveria ser avaliado por esses profissionais, já que tal modelo não considera a ruptura do tipo puncionamento quando há transposição de compressão para tração em fundações profundas. O manual apresenta para a capacidade de carga da hélice ( $Q_H$ ) de estacas em argila a seguinte equação:

$$Q_H = A_H(F_c c_u + \gamma' H) \quad 3.2$$

Onde  $A_H$  é área projetada da hélice,  $F_c$  é o fator adimensional de capacidade de carga em tração (para  $\frac{H}{D} > 7.5$ ,  $F_c = 9$ ),  $\gamma'$  é o peso específico efetivo do solo,  $c_u$  é a resistência não drenada da argila e  $H$  é a profundidade da hélice. Este manual recomenda uma redução na resistência não drenada, para levar em consideração o efeito de instalação no solo acima da placa helicoidal, dependendo da sensibilidade da argila.

Para a estaca em areia, este manual apresenta a seguinte equação:

$$Q_H = A_H(q'N_q) \quad 3.3$$

Onde  $q'$  é a tensão efetiva do solo na hélice, e  $N_q$  é o fator de capacidade de carga usado para determinar a resistência de ponta em fundações profundas, que depende do ângulo de atrito interno da areia. O manual da Chance sugere que se use na equação valores de  $N_q$  iguais aos valores proposto em Meyerhof (1976) dividido por 2, e também assume que o solo acima da hélice é o mesmo que o solo abaixo da hélice em uma zona em torno de 3 diâmetros de hélice, e que a capacidade à tração é igual à capacidade à compressão.

A Japan Road Association (2007) apresenta outro método para estimar a capacidade de carga de estacas de helicoidais hélice única, que não se baseia na equação de Terzaghi, descrito abaixo:

- Para solos não coesivos:

$$Q_u = \pi \cdot D \cdot \left( \gamma' \cdot L + \gamma \cdot \frac{H}{2} \right) \cdot H_s \cdot \beta \cdot \tan\phi + U \cdot \quad 3.4$$

- Para solos coesivos:

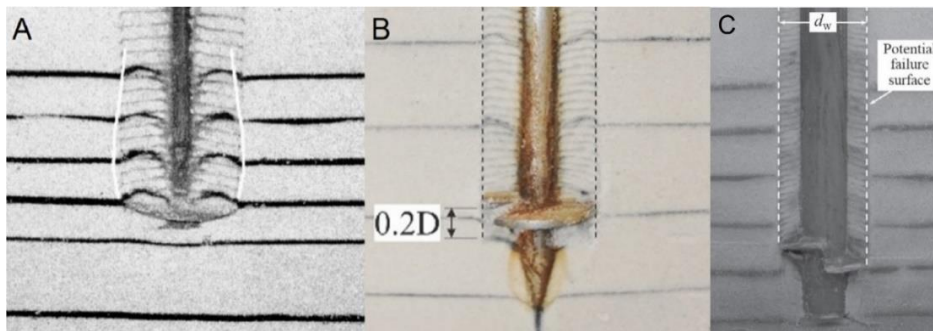
$$Q_u = c \cdot \pi \cdot D \cdot H_s + U \cdot L \cdot q_s \quad 3.5$$

Onde  $Q_U$  é capacidade de carga à tração,  $D$  o diâmetro da hélice,  $\gamma'$  é o peso específico efetivo do solo,  $L$  é o comprimento da estaca em que a resistência por atrito na haste é considerada,  $H_s$  é o comprimento da zona de ruptura acima da hélice e definido como  $\leq 2.5D$ ,  $\beta$  é um fator que corresponde ao coeficiente de Meyerhof para fundação em tração (coeficiente de empuxo lateral em tração,  $K_u$ ),  $\phi$  é o ângulo de atrito interno da camada,  $U$  é o perímetro da estaca,  $q_s$  é a resistência de atrito unitária, e  $c$  é a coesão do solo.

Este método da Japan Road Association (2007) assume que a superfície de ruptura acima da hélice sob tração é cilíndrica e não cônica, como considerada em alguns modelos de

ruptura de ancoragens na literatura. Ensaios de tração realizados em modelos de estacas helicoidais em areia (Nagata e Hirata 2005, Nagai *et al.* 2018 e Perez *et al.* 2018) mostraram que a zona de ruptura se estende ao longo da zona cilíndrica do solo revolvido pela instalação acima da hélice, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8: (a) Estaca modelo após ensaio de tração sob tensão confinante controlada (Nagata e Hirata (2015)); (b) Estaca modelo testada em centrífuga após deslocamento em tração de  $0,2D$  (Perez *et al.* 2018); (c) Estaca modelo após ensaio de tração em câmara de calibração (Nagai *et al.* 2018).



Fonte: Spagnoli e Tsuha, 2020.

### 3.2.3.2 Capacidade de carga à compressão

Trofimenkov e Maruipolshii (1965) testaram cerca de 200 estacas helicoidais de hélice única em solos argilosos e arenosos, e observaram que a capacidade de compressão é geralmente maior que a capacidade de tração, pelos seguintes motivos:

- (i) durante a compressão, a carga é transmitida para solo não perturbado abaixo da hélice;
- (ii) a área de suporte da carga sob compressão é maior do que sob tração (devido à área da ponta da estaca na compressão);
- (iii) a densidade do solo geralmente aumenta com a profundidade.

Esses autores sugerem que a capacidade de carga à compressão pode ser assumida como 1,3 vezes maior que em tração. A capacidade de carga da hélice em compressão também pode ser estimada pela equação de Terzaghi, usando fatores de capacidade de carga encontrados na literatura para estacas (Perko 2009). Embora a literatura recomenda o uso da equação de Terzaghi, na prática é visto que a equação não tem bons resultados quando usada em fundações profundas.

### 3.2.4 Método para estacas multi-hélices (profundas)

Os métodos mais comuns para previsão da capacidade de carga de estacas multi-hélices baseiam-se na análise tradicional do estado limite da engenharia geotécnica, como os métodos do cilindro de cisalhamento e de capacidade individual. Dependendo do espaçamento entre as hélices da estaca e condições do subsolo, a fundação pode apresentar ruptura de acordo com um dos dois métodos.

Se o espaçamento entre as placas helicoidais for muito grande, cada hélice irá agir de forma independente, e a capacidade de carga da estaca helicoidal é a soma das capacidades individuais de todas as hélices. Essa hipótese é chamada de método de "capacidade individual". No entanto, se o espaçamento entre as placas helicoidais for pequeno, as hélices trabalham em grupo. Neste caso, a capacidade de carga é a equivalente à resistência ao cisalhamento do solo entre a placa helicoidal inferior e a superior, ou seja, ao longo do cilindro de solo entre as placas helicoidais, somado com a capacidade individual da placa superior. Essa hipótese é chamada de método de "ruptura cilíndrica".

#### 3.2.4.1 Método de capacidades individuais

Este método assume que a ruptura ocorre no solo acima de cada hélice individualmente quando solicitada em tração, e a capacidade de carga da estaca é dada pelo somatório das capacidades individuais. Na Figura 3.9, um diagrama de esforços mostra uma distribuição idealizada de forças em uma estaca helicoidal. No caso de compressão o solo mobilizado é aquele abaixo das hélices (Figura 3.9a). Na tração o solo é mobilizado acima das hélices (Figura 3.9b). A resistência por atrito é mobilizada ao longo do comprimento da haste.

A capacidade de carga à tração final,  $P_u$ , da estaca é a soma das capacidades de carga individuais de  $n$  placas helicoidais, além da resistência por atrito lateral ao longo da haste, dada pela equação 3.6.

$$P_U = \sum_{i=1}^n q_{ult,i} \cdot A_i + \alpha H(\pi d) \quad 3.6$$

onde:

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

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

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

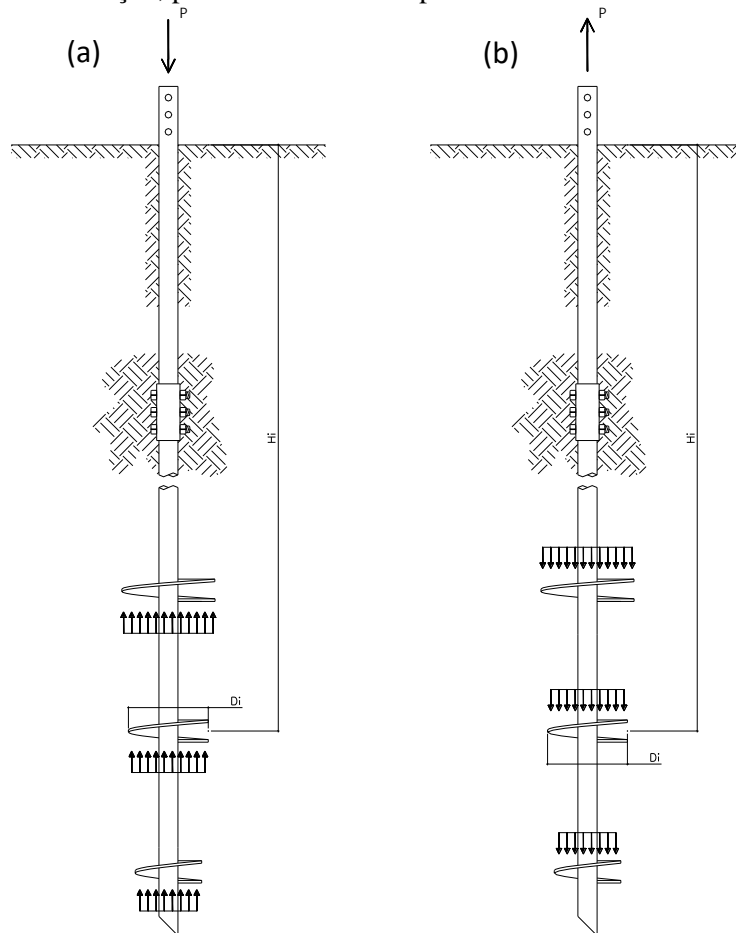
$\alpha$ : adesão ou atrito entre o solo e a estaca.

H: comprimento da haste da estaca helicoidal acima da hélice superior.

d: diâmetro da haste.

Tsuha (2007) cita que este método apresenta bons resultados quando o espaçamento de uma hélice não exerce influência no comportamento da outra. A A. B. Chance Co. (2003) afirma que um espaçamento de três diâmetros é suficiente para que a consideração seja válida.

Figura 3.9: Diagrama de esforços em estaca helicoidal submetida a esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método das capacidades individuais



Fonte: Adaptado de PERKO, 2009.

A tensão de ruptura de cada hélice ( $q_{ult}$ ) pode ser determinada usando a equação de capacidade de carga para elementos circulares dadas por Terzaghi (1943), ou pela fórmula modificada de Meyerhof (1951). Meyerhof (1951) modificou a fórmula de Terzaghi para incluir fatores de forma do elemento e profundidade. A equação modificada assumiu a forma mostrada na equação 3.7.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + \bar{q}N_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad 3.7$$

onde:

$c$ : coesão do solo;

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

$B$ : largura da hélice;

$\gamma$ : peso específico do solo;

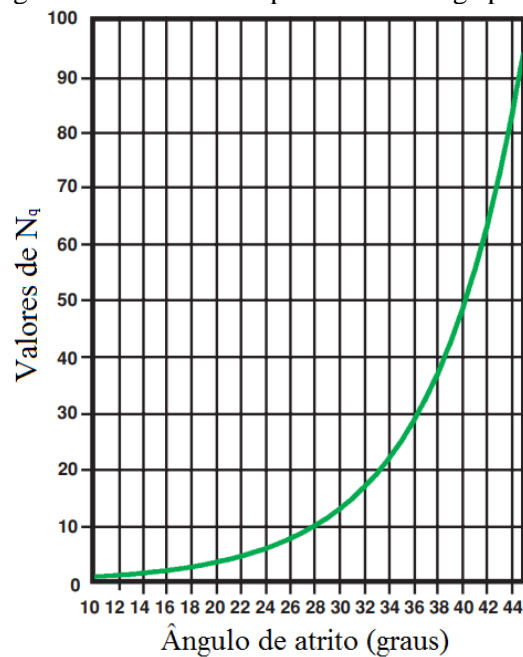
$N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$ : fatores de capacidade de carga;

$s_c$ ,  $s_q$  e  $s_\gamma$ : fatores de forma; e

$d_c$ ,  $d_q$  e  $d_\gamma$ : fatores de profundidade.

A. B. Chance Co. (1994) recomenda que se utilize o fator de capacidade de carga  $N_q$  da Figura 3.10. Neste caso, a capacidade de carga da estaca é a somatória da capacidade de carga individual de cada hélice, tanto no caso de tração como no caso de compressão.

Figura 3.10: Fator de capacidade de carga para areia



Fonte: A. B. Chance Co. (1994)

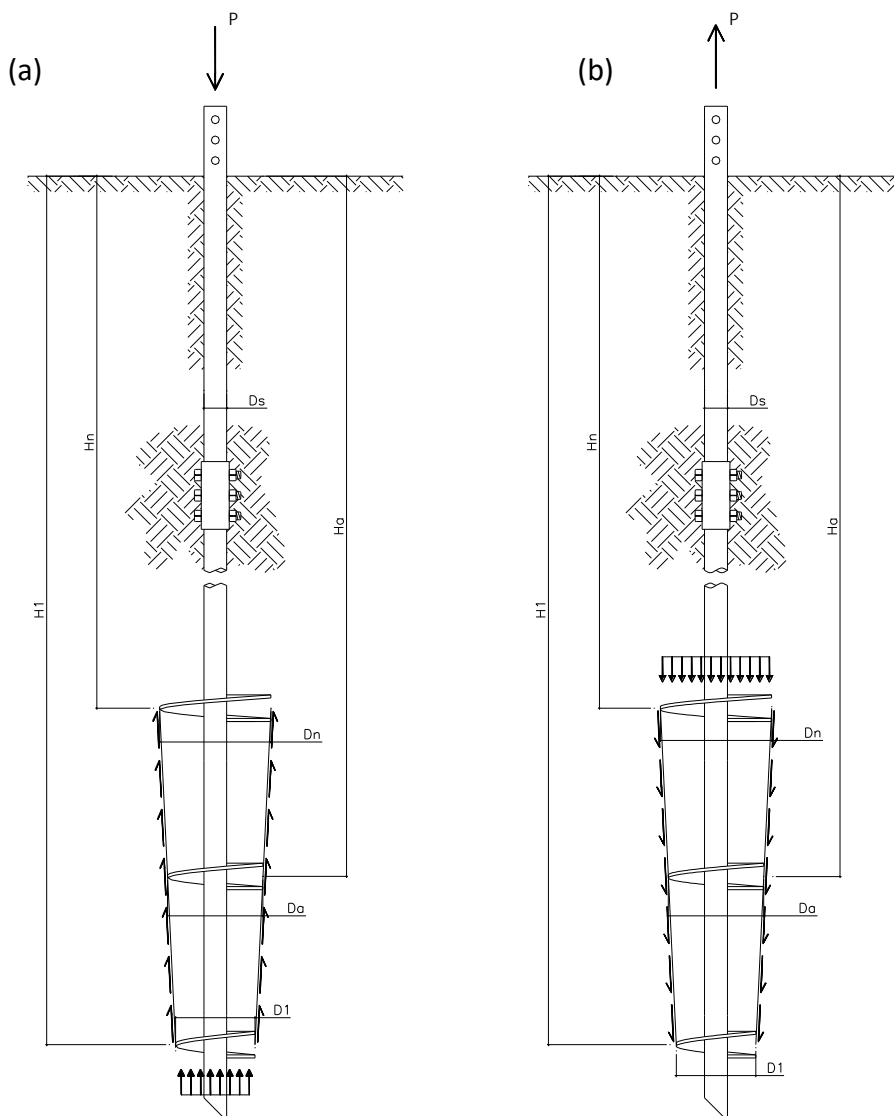
### 3.2.4.2 Método de ruptura cilíndrica

Segundo Perko (2009), Mooney *et al.* (1985) foram os primeiros a recomendar o uso de um modelo de ruptura cilíndrica para a previsão da capacidade de carga de uma estaca helicoidal

de múltiplas hélices. No método de ruptura cilíndrica, assume-se que a resistência ao cisalhamento do volume cilíndrico de solo entre as hélices é mobilizada.

A Figura 3.11a apresenta a distribuição de forças em uma estaca helicoidal de  $n$  hélices carregada em compressão pelo método de ruptura cilíndrica. Admite-se que na compressão é mobilizada a resistência do solo abaixo da hélice da ponta, e de cisalhamento na superfície formada pelo solo entre as hélices, e do atrito lateral na parcela de haste acima da hélice superior. Na Figura 3.11b, mostra um caso da estaca solicitada à tração, onde a hélice superior mobiliza a resistência do solo acima dela. Neste caso, a área da hélice é computada descontando-se a área da seção da haste (área líquida), e os parâmetros de resistência são relativos ao solo acima da hélice superior.

Figura 3.11: Resistência mobilizada em uma estaca helicoidal submetida a esforço (a) de compressão e (b) de tração, pelo o método de ruptura cilíndrica.



Fonte: Adaptado de PERKO, 2009.

A capacidade de carga à tração de estacas helicoidais ( $P_{UT}$ ) pode ser calculada usando-se o método de ruptura cilíndrica pelas equações 3.8, 3.9 e 3.10. A equação 3.8 é para estacas helicoidais em areia (MITSCH e CLEMENCE, 1985), e as equações 3.9 e 3.10 são para estacas em argila e em silte, respectivamente (MOONEY et al., 1985):

$$P_{UT} = N_q \gamma' H_n A_n + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_n^2 - H_1^2) K_u \tan \phi + p_s H_n \left( \frac{\gamma' H_n}{2} \right) K_u \tan \phi \quad 3.8$$

$$P_{UT} = A_n c N_c + \pi D_a c (H_n - H_1) + p_s H_n C_a \quad 3.9$$

$$P_{UT} = N_q \gamma' H_n A_n + A_n c N_c + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_n^2 - H_1^2) K_u \tan \phi + p_s H_n \left( \frac{\gamma' H_n}{2} \right) K_u \tan \phi + p_s H_n C_a \quad 3.10$$

onde:

$K_u$  = coeficiente de empuxo em tração para areias;

$A_n$  = área da hélice superior;

$H_1$  = profundidade da hélice da ponta;

$H_n$  = profundidade da hélice superior;

$D_a$  = diâmetro médio das hélices;

$N_q$  = fator de capacidade de carga à tração para areias;

$N_c$  = fator de capacidade de carga à tração para solo coesivo;

$p_s$  = perímetro do tubo da estaca;

$C_a$  = adesão ao longo do tubo da estaca.

As equações 3.8 a 3.10 também podem ser usadas para calcular a capacidade de carga à compressão das estacas helicoidais. A diferença é que a hélice inferior em conjunto com a ponta da haste resiste à compressão. Também no caso de compressão os parâmetros do solo relativos à hélice da ponta são equivalentes à resistência do solo abaixo da ponta. Neste caso podem-se usar fatores de capacidade de carga  $N_q$  e  $N_c$  propostos em Meyerhof, para calcular a resistência de ponta de estacas, sem considerar o efeito da instalação.



### 3.2.5 Resistência por adesão ou atrito na haste da estaca

Perko (2009) relata que há uma série de fenômenos que afetam a aderência do solo na haste da estaca. As estacas helicoidais com haste quadrada criam um furo redondo quando são instaladas no solo. Isso faz com que o solo fique fofo imediatamente ao longo da haste. A maioria das estacas helicoidais fabricadas tem luvas de acoplamento que são de um diâmetro ligeiramente maior do que a haste. Esses acoplamentos criam espaço vazio ao redor da haste após a instalação no terreno. Por estas razões, a resistência por atrito lateral ou adesão ao longo da haste muitas vezes é ignorada no cálculo da capacidade de carga da estaca helicoidal.

No entanto, a adesão ao longo da haste de uma estaca helicoidal pode contribuir para a capacidade de carga em certas circunstâncias. Nas hastes profundas e com diâmetros maiores, a parcela de resistência por atrito lateral na haste pode ser considerável. Ghaly e Clemence (1998) mostraram que uma resistência na interface significativa pode ocorrer mesmo em torno de hastes quadradas. Se a adesão ao longo do tubo da estaca em solo coesivo for contabilizada, pode ser aproximada pela equação 3.11.

$$\alpha = \frac{2}{3}T \quad 3.11$$

Onde T é a resistência ao cisalhamento do solo.

Mooney et al. (1985) citam que o solo argiloso é amolgado durante a instalação da estaca, e que a adesão na haste (chamada por estes autores de  $C_a$ ) varia entre 0.3 vezes o valor da coesão do solo (para areias rijas) a 0.9 vezes (para argilas moles).

### 3.2.6 Deslocamento vertical à tração da fundação por estaca helicoidal

Os métodos de capacidade individual e o cilindro tratam apenas do comportamento na ruptura. As estacas helicoidais projetadas usando um fator de segurança de 2,0 geralmente exibem deslocamentos aceitáveis em solos com boa capacidade de carga. Com base em muitos anos de experiência, Perko (2009) cita que o deslocamento de uma estaca helicoidal devidamente projetada e instalada em um solo de boa resistência é tipicamente da ordem de 13 a 25 mm ou menos sob carga de projeto. Porém, na prática brasileiras, é visto que as construtoras adotam um deslocamento máximo de 20 mm considerando a carga de projeto (com

um fator de segurança de 2). Ainda segundo Perko (2009), as fundações por estacas helicoidais com hastes de diâmetro maior exibem menor deslocamento do que estacas com hastes menores.

### 3.3 RELAÇÃO TORQUE-CAPACIDADE DE CARGA

O torque de instalação pode ser usado para verificar a capacidade carga de uma estaca helicoidal tanto em aplicações de compressão como tração. Ao longo dos últimos 50 anos, esse procedimento ajudou as estacas helicoidais a ganhar reconhecimento e popularidade. Segundo Ghaly e Hanna (1991) uma expressão empírica foi apresentada por Weikart e Clemence (1987) para correlacionar a capacidade de carga à tração de ancoragens helicoidais multi-hélices com o torque final de instalação. Esta correlação baseia-se em medições de dados de campo e experiência local dos autores. Esta expressão foi desenvolvida pela primeira vez pela A.B. Chance Company em 1977 e que tem a seguinte relação:

$$\text{Capacidade de carga à tração (kips)} = 8 \times \text{Torque final de instalação (ft.kips)}$$

Em 1989, Hoyt e Clemence revisaram a fórmula acima e introduziram um fator empírico ( $K_T$ ), que depende do diâmetro da haste da ancoragem helicoidal. Esta fórmula é reescrita aqui novamente conforme a equação 3.12:

$$Q_t = k_t \cdot T \tag{3.12}$$

Onde:

$Q_T$  = Capacidade de tração da estaca helicoidal;

$k_T$  = Fator de torque empírico; e

$T$  = Torque medido no final da instalação.

Eles determinaram estatisticamente valores de  $K_T$  igual a  $33 \text{ m}^{-1}$  para estacas com haste de secção quadrada e circular menor que 89 mm, de  $23 \text{ m}^{-1}$  para hastes redondas com 89 mm de diâmetro, e  $9.8 \text{ m}^{-1}$  para hastes circulares de 219 mm de diâmetro. Hoyt e Clemence (1989) concluíram que a utilização desta correlação ajuda a estabelecer limites de capacidade de carga esperada com base na medição do torque de instalação.

Segundo Sakr (2013) esta relação empírica entre de torque medido durante a instalação e capacidade da estaca helicoidal é amplamente usada na indústria na América do Norte, especialmente para estacas helicoidais de pequenas dimensões. Esta relação empírica de torque-capacidade de carga assume uma relação proporcional entre o torque medido no final da instalação e capacidade de carga da estaca por um fator de torque, conhecido como  $K_T$ , que independe da direção de carregamento (compressão ou tração). Deve ser mencionado que os valores de  $K_T$  publicados na literatura e adaptados no Manual Fundação Canadense de Engenharia (CFEM; 2006) basearam-se principalmente nos resultados dos ensaios de tração para as estacas de pequeno diâmetro. Portanto, os valores de  $K_T$  disponíveis podem não ser necessariamente apropriados para estimar a capacidade de carga à compressão de estacas helicoidais.

Sakr (2013) cita que o torque medido em solos arenosos é função de vários fatores como: (1) propriedades do solo, tais como ângulo de atrito do solo, ângulo de atrito de interface solo-haste, compacidade relativa, peso específico, presença de cascalhos ou pedras e nível do lençol freático; (2) configuração da estaca, tais como diâmetro da haste, a forma da haste da estaca, o número de hélices, o diâmetro das hélices, espessura de hélices, o valor do passo e a profundidade do embutimento; (3) forma da borda de corte das lâminas helicoidais (forma de V esfaqueado, plana, em forma de quadrado); (4) rugosidade da superfície do material da estaca (metal descoberto, metal revestido ou superfície galvanizada); (5) método usado para a fabricação da estaca helicoidal (hélices fundida; soldada; aparafusada etc.); (6) método de instalação, como a instalação em material natural ou perfurando por pré-furos antes de instalar estacas helicoidais e manutenção de avanço da estaca no solo a uma velocidade igual ao valor do passo para reduzir a perturbação do solo; e (7) acurácia dos dispositivos de medição de torque.

Ghaly e Hanna (1991) investigaram o torque de instalação usando modelos reduzidos de estaca helicoidais em solos arenosos. Eles se concentraram principalmente sobre as características geométricas da hélice. Os resultados de seus estudos indicaram que o torque de instalação depende da geometria da hélice (razão passo-diâmetro e a razão de diâmetros entre haste-hélice), as propriedades do solo e da profundidade de instalação.

Perko (2000) propôs uma correlação entre o torque de instalação e a capacidade de carga da estaca baseada em um modelo baseado em energia. No entanto, a principal limitação do modelo é que ele exige vários parâmetros, alguns dos quais não são facilmente mensuráveis durante a instalação da estaca, tais como força vertical (ou seja, força ascendente exercida durante a instalação da estaca). Tsuha e Aoki (2010) apresentaram um modelo teórico

simplificado que relaciona o torque necessário para instalar estacas helicoidais em areia com sua capacidade de carga à tração. O modelo foi avaliado por meio de ensaios em centrífuga e apresentou boa concordância com os valores medidos.

Sakr (2013) concluiu que os fatores de torque para estacas em compressão e em tração para estacas semelhantes instaladas em solos arenosos são diferentes, e que fatores de torque no caso de compressão são geralmente mais elevados do que na tração. Ao comparar os fatores de torque teóricos com os valores reportados na literatura, este autor notou que existe uma variação de fatores relativamente alta entre os fatores de torque medidos e estimados. A grande variação ocorre devido ao número de fatores, incluindo a perturbação do solo devido a métodos de instalação, flutuação dos níveis da água subterrânea, e má qualidade das medições de torque concebidas.

Segundo Ghaly e Hanna (1991), em 1979, Udvari *et al.* apresentaram uma abordagem racional para o projeto de estacas helicoidais multi-hélices de alta capacidade. Eles mostraram que os fatores que afetam o torque de instalação da estaca são: força vertical aplicada na instalação para permitir o avanço de um passo por volta, velocidade de avanço no solo, nível de torque aplicado, ângulo de instalação (para ancoragens inclinadas) e profundidade de instalação. Em relação ao desempenho das estacas sob tração os principais fatores são: propriedades geométricas da estaca, relação de diâmetros da hélice-haste, capacidade estrutural da hélice, haste de extensão e tipo de conexões (rosca, aparafusada ou soldada).

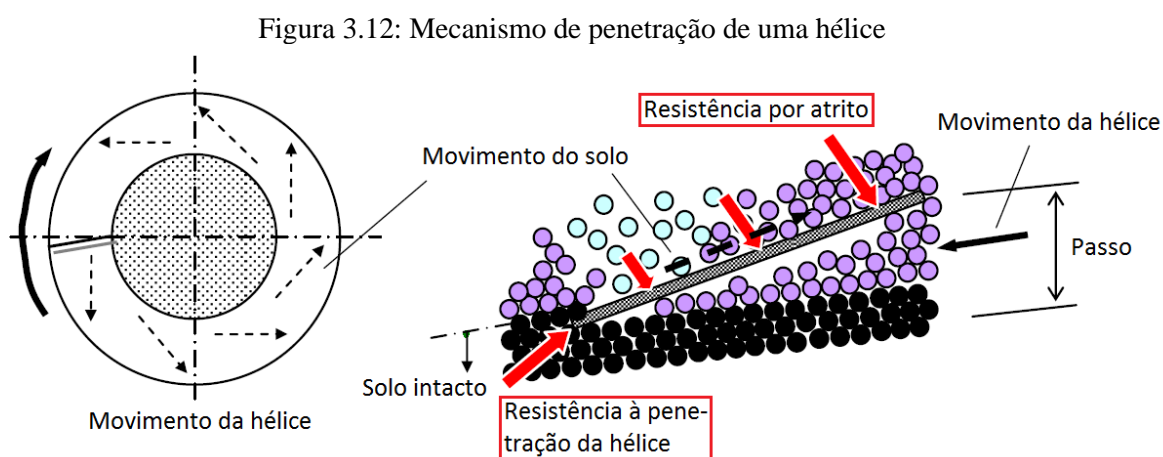
### 3.4 EFEITO DE INSTALAÇÃO NA CAPACIDADE DE CARGA AXIAL DAS ESTACAS HELICOIDAIS

Durante o processo de instalação destas estacas, ocorrem modificações no solo atravessado pelas hélices. Por isso, alguns autores têm sugerido reduções de alguns parâmetros do solo, a fim de considerar o efeito da perturbação causada pela instalação na avaliação da capacidade de carga.

Kulhawy (1985), por exemplo, afirma que ocorre uma modificação das propriedades do solo no interior da zona cilíndrica de instalação da estaca helicoidal e, como resultado, as estacas com uma hélice comportam-se de maneira similar às ancoragens em placa (instaladas e depois re-aterradas). De acordo com este mesmo autor, o efeito da perturbação pode ser aproximado relacionando-se as propriedades modificadas com as propriedades *in situ*.

Kanai (2007) estudou no Japão o mecanismo de penetração de estacas helicoidais através de vários modelos de análise. A Figura 3.12 apresenta um modelo para o movimento das partículas do solo em torno de uma hélice definido através da observação direta por câmera de vídeo. Como pode ser visto na Figura 3.12, durante a penetração da estaca o solo na borda inferior da hélice inicia um movimento em direção à borda superior. Este fato causa o “afofamento” do solo dentro do cilindro acima das hélices. Observações do perfil de solo e medidas do empuxo de terra sustentam esta tendência.

No experimento de Tsuchiya *et al.* (2007), foram utilizados grãos de arroz para modelar o solo. Segundo os autores, as estacas helicoidais podem ser classificadas em estacas de deslocamento, tais como as estacas cravadas, observando-se as características básicas de penetração. Mas, devido a este mecanismo de penetração, o comportamento carga *versus* deslocamento da estaca é mais semelhante ao de uma estaca escavada, pois se observa uma região de solo desconfinado próximo às hélices.



Fonte: Adaptado de KANAI, 2007.

Alguns autores investigaram experimentalmente o efeito da perturbação causada pela instalação na capacidade de carga à tração de estacas helicoidais (Weech e Howie 2001, Tsuha *et al.* 2012, Lutenegger *et al.* 2014, Tsuha *et al.* 2015, Lutenegger e Tsuha 2015, Perez *et al.* 2018), e os resultados mostram que na instalação os efeitos variam de acordo com o tipo de solo e a geometria da estaca.

Lutenegger e Tsuha (2015) apresentaram uma comparação entre capacidade de carga à tração e à compressão de estacas helicoidais em diferentes solos, para ilustrar o efeito da instalação nos resultados da capacidade à tração. Esses autores mostraram que o efeito de instalação sobre a de carga de tração varia de acordo com o tipo de solo. As principais conclusões deste trabalho foram:

1) Para estacas de hélice única e múltipla em argilas rijas as relações entre capacidade em tração e em compressão (T/C) são próximas a 1,0, indicando que há pouco efeito prejudicial da instalação;

2) A relação T/C de estacas instaladas em solos arenosos e argila mole varia de 0,5 a 1,0, sugerindo efeitos consideráveis de instalação em alguns casos;

3) A razão T/C observada em solos residuais estruturados altamente porosos é em torno de 0,2, indicando efeito de instalação substancial e representando a quebra significativa da estrutura natural do solo. Por outro lado, a relação T/C é de aproximadamente 0,75 para estacas com várias hélices em solos residuais (areia siltosa) de maior compacidade.

Estes autores comentam que embora sejam necessárias comparações em uma variedade maior de solos para desenvolver diretrizes racionais de projeto, os resultados sugerem que a qualidade da instalação é importante e pode influenciar o desempenho. O monitoramento do torque de instalação, taxa de avanço e velocidade de rotação são importantes medidas de controle de qualidade que podem fornecer pistas sobre o grau de perturbação produzido.

Mais recentemente, Sharif *et al.* (2019) apresentaram um trabalho em que investigaram a instalação de estacas helicoidais e seu carregamento em areia usando DEM (método de elemento discreto). A partir deste procedimento, calibrado usando resultados de ensaios em centrífuga em areia, os autores avaliaram as mudanças nas tensões locais e na compacidade causadas pelo processo de instalação. Eles encontraram pelas simulações que a compacidade relativa inicial do solo ao redor da estaca muda após a instalação de 80% para 55%.

Novas investigações experimentais e numéricas sobre os efeitos da instalação de estacas helicoidais no solo são de grande importância para a melhoria do dimensionamento deste tipo de fundação. Este é um dos aspectos que faz parte dos objetivos da presente tese.

### 3.5 ENSAIOS EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

#### 3.5.1 Considerações iniciais

As câmaras de calibração são usadas para ajudar no processo de desenvolvimento de correlações entre resultados de ensaios de investigação *in situ* e diferentes parâmetros do solo. Ensaios realizados em câmara de calibração representam uma técnica bem estabelecida para a calibração de ensaios *in situ*, em que uma amostra de material conhecido, com compacidade conhecida, é preparada dentro da câmara de calibração e testada sob condições de confinamento controladas. Um pressuposto inerente à metodologia de ensaio na câmara é que as medições

feitas por um equipamento *in situ* na câmara sejam os mesmos que aqueles no campo, desde que o material seja idêntico e as tensões *in situ* sejam corretamente reproduzidas. Esta hipótese não é estritamente válida, uma vez que uma grande massa de areia modelada no laboratório corresponde a uma amostra cilíndrica restringida por limites físicos dentro de uma zona finita.

Resumidamente, as desvantagens de se executar ensaios geotécnicos em campo, onde as condições de contorno do problema são desconhecidas, são superadas quando estes ensaios são realizados em modelos físicos em escala natural ou reduzidos. As câmaras de calibração constituem uma ferramenta que permite a realização de ensaios em amostras de areia com diversas compacidades e sob estados de tensões e deformações conhecidos e controlados. Até os dias atuais, ensaios em câmara de calibração têm sido extensivamente usados para testes em ensaios de cone (CPT), no entanto, existem raros trabalhos na literatura sobre ensaios de estacas helicoidais em câmara de calibração.

### 3.5.2 Breve histórico

As câmaras de calibração têm sido utilizadas há muitos anos em experimentos laboratoriais, variando consideravelmente em tamanho e sofisticação. O desenvolvimento das câmaras de calibração se moveu na direção de maior complexidade; algumas permitem o controle sobre as tensões das amostras e a história de tensões, bem como simulam diferentes tipos de condições de contorno. Junto com esta tendência veio uma maior preocupação com os métodos de preparação de solo dentro da câmara, para minimizar variações de densidade de amostras e outras características estruturais pronunciadas no solo.

Na Tabela 3.1 é apresentada uma lista das câmaras conhecidas, juntamente com as suas características mais importantes. Todas as câmaras listadas na Tabela 3.1 têm limites laterais flexíveis, tais câmaras geralmente são referidas como câmaras de paredes flexíveis.

Tabela 3.1: Câmaras de calibração existentes no mundo

Câmara de Calibração	Diâmetro da amostra (m)	Altura da Amostra (m)	Condições de contorno			Câmara de Calibração	Diâmetro da amostra (m)	Altura da Amostra (m)	Condições de contorno		
			Radial	Base	Topo				Radial	Base	Topo
CRB, Austrália	0.76	0.91	Flexível	cushion	Rígido	Universidade de Houston	0.76	2.54	Flexível	cushion	cushion
Universidade da Flórida, Gainesville	1.20	1.20	Flexível	cushion	Rígido	Universidade do estado da Carolina do Norte	0.94	1.00	Flexível	Rígido	Rígido
Universidade de Monash, Austrália	1.20	1.80	Flexível	cushion	Rígido	Golder Associates, Calgary	1.40	1.00	Flexível	Rígido	cushion
UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro	1.20	1.50	Flexível	cushion	Rígido	Virginia Tech, Blacksburg	1.50	1.50	Flexível	Rígido	Rígido
ENEL-CRIS, Milão	1.20	1.50	Flexível	cushion	Rígido	Universidade de Grenoble, França	1.20	1.50	Flexível	cushion	cushion
ISMES, Bergamo	1.20	1.50	Flexível	cushion	Rígido	Universidade de Oxford, Inglaterra	0.90	1.10	Flexível	cushion	Rígido
Universidade da Califórnia, Berkeley	0.76	0.80	Flexível	Rígido	Rígido	Universidade de Tóquio, Japão	0.90	1.10	Flexível	Rígido	Rígido

Fonte: Salgado, Mitchell e Jamiolkowski, 1998

*ENEL-CRIS* é o laboratório de pesquisa da empresa italiana *Electricity Company*, com divisões geotécnicas, estruturais e hidráulicas. *ISMES* é uma empresa de pesquisa de capital misto. Ambas as organizações têm câmaras de calibração semelhantes ao do *Australian Country Roads Board (CRB)*, que desenvolveu a sua primeira câmara de calibração em 1969 (Holden, 1971).

Segundo Ghionna e Jamiolkowski (1991), as câmaras de calibração usadas em pesquisas de diferem em alguns aspectos, incluindo dimensões; rigidez e natureza dos contornos lateral, topo e base; procedimentos de deposição da amostra; capacidade de manipular amostras saturadas; e forma de controle das condições de contorno.

Segundo Sweeney e Clough (1990), um ponto interessante sobre muitas das câmaras é que seus projetos podem ser rastreados até uma fonte. O “Avô” da maioria destas câmaras parece ser o único que se originou na *the County Road Boards (CRB)*, na Austrália.

Em relação às técnicas de preparação da amostra de areia, elas podem ser divididas em duas categorias principais: “espalhadores de areia” e a de “chuva de areia”. Os Espalhadores de areia consistem de um funil de areia que se desloca lateralmente, por cima da amostra sobre uma plataforma fixa. O funil de areia é um dispositivo mecânico, que deixa cair as partículas de areia para baixo com uma velocidade projetada para obter certa densidade. A técnica de “chuva de areia” como descrita por Jacobsen (1976) é utilizada para produzir 1m de espessura de amostras homogêneas com um desvio inferior a 1% da compactidade relativa. De acordo com Parkin e Lunne (1982), este procedimento parece ser o método mais amplamente aceito para a preparação de amostras de areia por causa da repetibilidade de amostras homogêneas formadas e a simplicidade do equipamento.

### 3.5.3 Condições de contorno e o efeito das dimensões da câmara de calibração

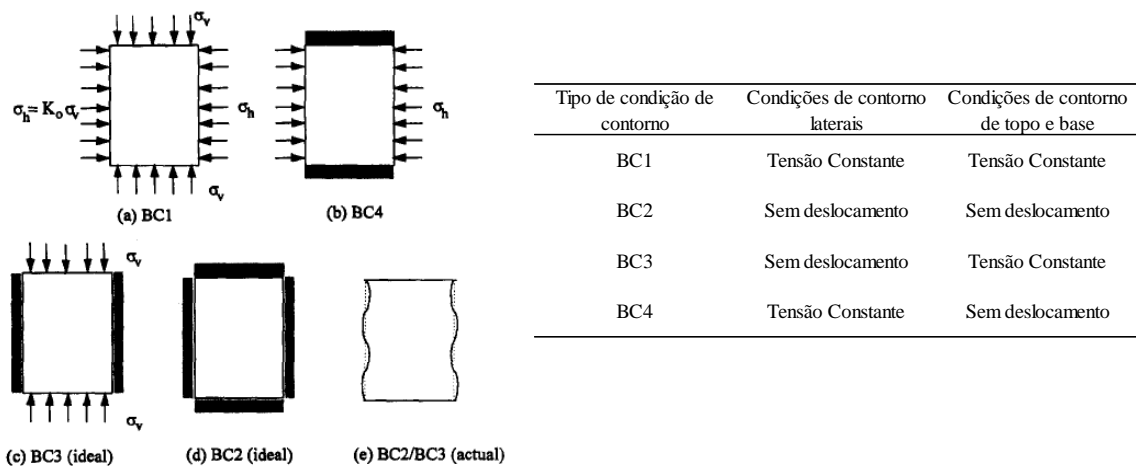
Segundo Salgado *et al* (1998) existem quatro tipos de condições de contorno em uma câmara de calibração (Figura 3.13), são elas BC1, BC2, BC3 e BC4, e que a maioria dos ensaios realizados em câmara de calibração é feita utilizando condições BC1. As diferenças entre os quatro tipos estão em: se tensão ou deslocamento são impostos no topo, base e na superfície periférica da amostra. No caso de ensaios de cone de penetração (CPT), a pressão circunferencial como condição de contorno é a mais importante, por este motivo a condição BC1 é mais empregada.

Lee e Salgado (2000) também estudaram o efeito das dimensões de câmaras de calibração, realizando ensaios em placa. Suas análises mostraram que os resultados para o BC3



foram bem similares aqueles para BC1, e que os resultados para BC4 foram similares àqueles para BC2. Por fim, eles concluíram que: “*A magnitude do efeito de dimensão é pequeno, validando o uso de testes em câmaras para simular carregamento na base da estaca*”. De acordo com a recomendação de Salgado et al. (1998) a respeito de testes de penetração de cone em câmaras de calibração, recomenda-se que BC1 ou BC3 seja utilizado em câmaras de calibração em carregamento de ensaios de placa.

Figura 3.13: Tipos de condição de contorno para câmara de calibração



Fonte: Salgado *et al.*, 1998.

A maioria dos trabalhos anteriores que avaliam as dimensões da câmara e os efeitos das condições de contorno é experimental (Bellotti *et al.* 1982; Sisson 1990; Mayne e Kulhawy 1991) e se concentram principalmente na condição BC1. Existe uma incerteza de aproximadamente  $\pm 5\%$  para a compacidade relativa. Além disso, as amostras não são perfeitamente uniformes, e resistência à penetração irregular contra curvas de profundidade resultantes da heterogeneidade leva a incerteza quanto ao valor real para usar nas regressões. Por conta disto, é necessário um grande número de ensaios realizados em condições de densidade e de tensão semelhantes para compensar essas incertezas, que, devido às grandes dimensões das amostras e às exigências de trabalho e de tempo, geralmente é impraticável.

Outro aspecto em estudos experimentais para determinar as dimensões da câmara e os efeitos da condição de contorno é o valor da razão entre o diâmetro da câmara e o diâmetro do cone ( $D_L$ ) no qual o efeito de dimensão não é mais importante. Por exemplo, Mayne e Kulhawy (1991) assumem o valor de  $D_L$  igual a 70, independentemente da compacidade relativa inicial e o estado de tensão.

A maior série de testes destinados a definir as condições de contorno e os efeitos das dimensões da câmara foi a série italiana realizada na ENEL-CRIS e no ISMES. Estes ensaios incluíram quatro penetrômetros de diâmetros diferentes (3.57 cm, 2.54 cm, 2 cm e 1 cm) e uma câmara de calibração de diâmetro de 120 cm. Poucos testes foram realizados com o cone pequeno. A série de testes cobriram toda a gama de compacidades relativas, desde fofa a compacta, e de tensões verticais de 50 a 700 kPa, com a relação de sobreadensamento variando de 1 a cerca de 15. Embora várias centenas de testes tenham sido realizados, o número de testes para um dado conjunto de condições iniciais (aproximadamente a mesma compactidade relativa e estado de tensões) e diferentes dimensões de cone é limitada e não abrange toda a gama de relações de diâmetro.

Devido a estas dificuldades, uma quantificação satisfatória das dimensões da câmara e efeitos do tipo de contorno requer estudos experimentais e teóricos. Tseng (1989) e Sisson (1990) investigaram os efeitos das dimensões da câmara, utilizando diferentes abordagens teóricas, mas por razões diferentes não obtiveram resultados que poderiam explicar completamente o que é observado em testes reais nas câmaras. Isto pode ter sido causado pelo uso de modelo de expansão da cavidade com base em Vesic (1972), que não leva em conta fatores que podem ter um impacto importante na resistência à penetração, como a dilatância do solo.

Parece haver um consenso de que os testes em areia fofa simulam condições de campo razoavelmente bem, enquanto que testes em areia compacta são significativamente afetados pela proximidade da fronteira da câmara. Nenhuma análise foi realizada para avaliar os efeitos das dimensões da câmara em compacidades relativas intermediárias. O desprezo dos efeitos das dimensões da câmara leva a uma superestimativa da compactidade (e ângulo de atrito), especialmente quando condições de contorno de tensão radial constante são usadas na câmara.

Analisando ensaios de cone, Salgado, Mitchell e Jamiolkowski (1998) chegaram à conclusão que seria desejável adotar as condições de contorno BC1 ou BC4 como um padrão para testes de câmara de calibração. Eles concluem que as condições BC2 e BC3 em câmaras de parede flexível não podem ser modeladas de forma adequada. Os autores fizeram um estudo paramétrico usando a teoria proposta por Salgado *et al.* (1997), que mostrou que a compactidade relativa da areia e o estado de tensão são os fatores mais importantes, e que afetam a magnitude do efeito das dimensões da câmara observado para BC1 e BC4.

### 3.5.4 Principais técnicas de preparação de amostras de areia

#### 3.5.4.1 Considerações iniciais

A técnica usual para se estudar problemas em solos arenosos tem sido utilizar amostras reconstituídas, no domínio de compacidades relativas existentes em campo. As condições de umidade e o modo de depositar a areia são duas características preliminares presentes em qualquer metodologia de preparação de amostras. A areia a ser depositada para a formação do corpo de prova pode estar nas seguintes condições de umidade: seca, saturada ou úmida. Dentre as técnicas de preparo de amostra mais conhecidas e utilizadas tem-se a “Chuva de areia” por meio do ar ou da água. Estas duas e outros métodos de preparação de amostra de areia serão abordados a seguir.

#### 3.5.4.2 Chuva de areia

Considera-se que a técnica de chuva de areia se aproxima de um processo de deposição natural. Tanto a natureza da anisotropia, quanto a estrutura do solo obtido por métodos de chuva de areia, foram considerados ótimos em reproduzir os solos arenosos observados em um ambiente aluvial natural. Portanto, esta técnica de preparação de amostras permite um estudo conveniente da resposta mecânica das areias naturais.

Este método consiste em verter areia seca através de um recipiente de abertura pré-selecionada. Uma dada vazão, controlada pela abertura escolhida, produz como resultado um corpo de prova com uma determinada compacidade relativa. Mulilis *et al.* (1975) e Miura e Toki (1982) comentam que a abertura do bocal e a altura de queda são os fatores determinantes para a compacidade relativa do corpo de prova. A altura pela qual a areia cai durante a chuva de areia tem sido usada para obter amostras de várias compacidades relativas, embora os pesquisadores tenham opiniões divergentes quanto ao grau de seu sucesso. A influência do aumento da altura da queda na compacidade relativa obtida foi considerada significativa para Tatsuoka *et al.* (1979), pequena para Mulilis *et al.* (1975) e insignificante para Miura e Toki (1982).

Em 1984, Vaid e Negussey fizeram um estudo detalhado sobre a influência da altura de queda no índice de vazios para tentar esclarecer o assunto. A conclusão foi que: as energias de impacto continuarão aumentando com o aumento das alturas de queda até que a velocidade final seja atingida, e os resultados dos casos que aumentam a energia de impacto além de certa

magnitude máxima compactam pouco a areia. Isto explica os resultados de Miura e Toki (1982) que observaram alterações insignificantes no índice de vazios com mudança na altura de queda. Para a faixa de altura de queda de 30 a 70 cm que eles investigaram, pouca mudança na relação de vazios resultante pode ser notada. Argumentos semelhantes podem ser aplicados às observações de Mulilis *et al.* (1975), que notaram apenas um efeito menor da altura da queda na razão de vazios resultante.

Ainda segundo Vaid & Negussey (1984), os argumentos apresentados acima são baseados em hipóteses idealizadas de que a areia consiste em esferas uniformes que sofrem queda livre sem interferência mútua. Na realidade, o índice de vazios obtido pela areia para uma determinada altura de queda dependerá do tamanho médio de partícula, gradação da areia, taxa de massa de areia “derramada” (fluxo da areia) e as características do recipiente (câmara de calibração), tais como o seu diâmetro e rugosidade da superfície, particularmente para pequenos diâmetros. Taxas mais alta do fluxo introduziriam efeitos de interferência que podem inibir as partículas de adquirirem a configuração mais estável (e, portanto, provavelmente compacta) quando estão em repouso. Taxas mais altas de fluxo de areia dentro de um recipiente cilíndrico também podem aprisionar uma massa de ar, cuja eventual fuga pode causar uma corrente de ar contrária para cima, reduzindo assim a energia de impacto e, portanto, resultando em menor compactação. Um moldador de amostra revestido de membrana, especialmente de um diâmetro menor, inibirá ainda mais o “empacotamento” mais compacto devido à restrição do lado de atrito.

Oliveira Filho (1987) comenta que este método é desaconselhado para solos com coeficiente de desuniformidade superior a 5, por conta de segregação de material. Vaid e Negussey (1984) explicam que, se a areia for bem graduada ou contiver quantidades significativas de finos, a saturação do ar resultará claramente em segregação, devido às partículas mais finas ficarem para trás por conta de suas velocidades menores dentro da queda de altura fixa. Eles ainda afirmam que, mesmo quando a areia é relativamente uniforme, um controle acurado da altura da queda é crucial para garantir amostras homogêneas.

#### 3.5.4.3 Chuva de areia na água ou sedimentação

Neste método verte-se areia saturada no molde cheio d'água. A partir deste procedimento obtêm-se amostras fofas. Caso se queira maiores compacidades, procede-se a vibrações até se atingir a compacidade relativa desejada (método misto). Oliveira Filho (1987)

comenta que este método apresenta o mesmo inconveniente da segregação para solos não uniformes.

Vaid & Negussey (1984) comentam que a chuva de areia em água, em contraste com o ar, não terá nenhum perigo de introduzir não homogeneidade na amostra devido à variação na altura de vazamento durante a deposição. Isso ocorre porque os grãos do solo atingem a velocidade terminal quase instantaneamente e mantida até a deposição, independentemente da altura da queda. Amostras com compacidades relativas maiores, se desejadas, podem ser obtidas por vibrações.

#### 3.5.4.4 Compactação com o uso de soquete

Neste método, independente da umidade, a areia é compactada com o uso de soquete, usando-se um determinado número de golpes. Os corpos de prova podem ser formados compactando-se todo material de uma vez só ou fazendo-se por camadas. Neste caso, é muito usada a recomendação de Ladd (1978) de sub-compactar as camadas inferiores, uma vez que a compactação de cada camada sucessiva compacta as inferiores; tal procedimento foi proposto a fim de se obterem corpos de prova mais uniformes.

#### 3.5.4.5 Compactação com o uso de um vibrador

Já é bem conhecido que vibrações ou impactos podem ser usados para compactar solos arenosos, como em compactações vibratórias. Da mesma forma, esses procedimentos de compactar têm sido frequentemente aplicados em ensaios de laboratório para estabelecer a compacidade máxima das areias. Em qualquer condição de umidade, a areia é submetida a um movimento de vibração que pode ser vertical ou horizontal. A frequência de vibração é alta, embora sejam relatadas experiências que realizaram baixas frequências. Os corpos de prova formados com este procedimento apresentam compacidades relativas que correspondem ao tempo de duração de aplicação da vibração. A colocação de sobrecarga, mesmo sendo uma prática comum, tem sua eficiência questionada por vários pesquisadores. Apenas como observação, vale ressaltar que a frequência de vibração alta em solos é algo em torno de 120 Hz, e a frequência de vibração baixa é em torno de 20 Hz ou menos.

Miura e Toki (1982) notaram que a compacidade máxima obtido no método da chuva de areia ao ar é mais alto ou quase idêntico ao da densidade máxima obtida do método de compactação com uso de vibrador. No entanto, as areias que contêm frações mais finas,

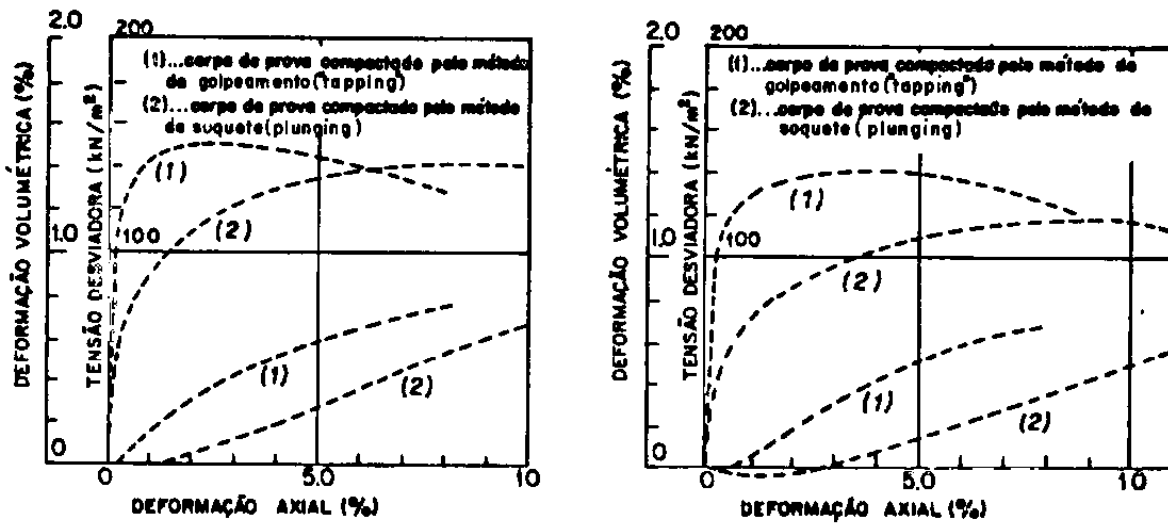
superiores a 10%, mostram que as densidades máximas obtidas pelo método da chuva de areia são menores que as densidades máximas produzidas pelo método de compactação. Isso pode ser atribuído ao fluxo de areia não uniforme ou à ocorrência de segregações de partículas durante a chuva de areia, que não poderiam ser evitadas em areias com coeficiente de uniformidade relativamente alto.

#### 3.5.4.6 Influência do método de preparação sobre os resultados dos ensaios

Nas pesquisas realizadas com solos arenosos, é raro ver referência de que método de preparação de amostras reconstituídas possa ter influenciado os resultados do ensaio. Inclusive, Ladd (1974) chamou atenção de que na época em vários artigos nem sequer o procedimento adotado na preparação de amostras era descrito. Desde então, vários pesquisadores têm estudado este aspecto a partir de ensaios estáticos e dinâmicos em solos arenosos com diversos métodos de preparação da amostra.

Miura e Toki (1982) relatam significativas diferenças, principalmente em ensaios triaxiais de extensão. Ladd (1974) estudou liquefação das areias em ensaios cíclicos, e concluiu que os resultados daqueles ensaios poderiam ser sensivelmente afetados pelo método de preparação da amostra, do mesmo modo concluíram vários outros autores. Mulilis *et al.* (1975) observaram que as diferenças encontradas não eram as mesmas, caso variasse o tipo de solo, ou seja, as diferenças seriam também função do tipo de solo. ODA (1972) verificou que esta influência era marcante nas areias com partículas angulares e alongadas. A Figura 3.14 mostra tais influências.

Figura 3.14: Resultados de ensaios triaxiais com areia de Toyura preparados por dois 2 métodos diferentes



Fonte: Adaptado de ODA, 1972.

Constatadas as diferenças entre os métodos de preparação da amostra, buscou-se uma explicação para os resultados. Tal diferença se dá por basicamente dois fatores que normalmente são ignorados, o arranjo dos grãos (“Fabric”) e a história de tensões durante a moldagem do corpo de prova. A seguir, são abordados estes dois fatores.

#### 3.5.4.6.1 Arranjo dos grãos (“Fabric”)

Já é conhecido hoje que um determinado solo granular pode ter diferentes arranjos de seus grãos, apresentar o mesmo índice de vazios e ter comportamentos diferentes de um arranjo para outro. A estrutura de um material é definida pelo arranjo de suas partículas e dos vazios associados. Para ODA *et al.* (1980), o conceito de estrutura para uma amostra de material granular macroscopicamente homogênea deve incluir: uma medida de orientação individual das partículas (“*Orientation Fabric*”) e uma medida que reflita a relação entre as partículas (“*packing*”). O “*Orientation Fabric*” descreve o arranjo preferido das partículas, consideradas individualmente em relação a um referencial tridimensional. Já o “*Packing*” descreve a geometria do arranjo do grupo de partículas, ou seja, o posicionamento relativo. Em sua pesquisa, ele comenta que a estrutura de suas amostras era resultado tanto da forma das partículas como do modo como elas foram depositadas.

Outros pesquisadores (ODA, 1972; Arthur e Menzies, 1972; e ODA e Kcishikawa, 1978) também constaram que a areia, quando depositada sob ação da gravidade, mostra uma

anisotropia em termos de resistência ao cisalhamento. A explicação encontrada para anisotropia seria devido ao alinhamento preferencial das partículas ao plano de deposição ou acamamento.

#### 3.5.4.6.2 Tensões no solo durante a moldagem

Outro fator que influencia o resultado final é a tensão no solo durante a moldagem. Mahomood *et al* (1976) estudaram a compressibilidade das areias preparadas a partir de 2 métodos: chuva de areia no ar e vibração. Propositamente, os autores eliminaram a variável “partículas angulares e alongadas”, utilizadas por ODA (1972) ao trabalharem nos ensaios com a areia de Monterey nº0 de grãos arredondados e pouco alongadas. Eles verificaram que, tanto no caso de amostras preparadas por chuva de areia como no caso das amostras preparadas por vibração, a distribuição do eixo maior das partículas não tinha uma orientação preferencial (randômico). Somente no caso de uma vibração prolongada ocorria o alinhamento preferencial das partículas de 40° em relação à horizontal.

No entanto, os resultados do ensaio eodométrico indicaram diferenças significativas entre as amostras preparadas por chuva de areia no ar e vibração. Comparando as amostras de aproximadamente mesma compacidade relativa (ambas sem orientação preferencial), Mahmood *et al.* (1976) observaram que a amostra preparada por chuva de areia apresentou-se mais compressiva. Eles atribuíram tal fato à diversidade no estado inicial de tensões. No corpo de prova preparado por chuva de areia, os grãos se arranjarão sem se submeterem a nenhuma ação adicional externa, além da gravitacional, o que explicaria sua maior compressibilidade para baixas tensões. No caso do corpo de prova preparado por vibração adquire um arranjo eficiente em resistir a um determinado tipo de solicitação, o que tornava também mais resistentes às deformações durante o carregamento estático.

### 3.5.5 Simulações das condições de campo x métodos de preparação dos corpos de prova

#### 3.5.5.1 Considerações iniciais

Os métodos de preparação de amostra de areia em câmara de calibração devem ser tais que reproduzam não só a porosidade, como também o “Fabric” e a história de tensões do campo. A influência do método de preparação nos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento se faz notar principalmente no domínio das pequenas deformações. Esta



observação é bem razoável, já que, para grandes deformações, as amostras se aproximam da ruptura, e a história de tensões do ensaio “apagam” (parcialmente) a história de tensões gerada durante a moldagem.

### 3.5.5.2 Solos sedimentares

Conforme escrito no livro de Lambe & Whitman (1969), a maioria dos solos arenosos é de origem sedimentar, formados principalmente pela intemperização física de rochas e transportados por diversos agentes, como mostra a Tabela 3.2. A formação de solos sedimentares pode ser melhor apresentada considerando a formação de sedimentos, o transporte de sedimentos e a deposição de sedimentos, respectivamente, conforme será descrito a seguir.

- (1) **Formação de sedimentos:** A forma mais importante de formar sedimentos é o desgaste físico e químico das rochas na superfície da terra. Geralmente, as partículas de areia, silte e cascalho são formados pelo desgaste físico das rochas e as partículas de argila são formadas pelo desgaste químico das rochas.
- (2) **Transporte de sedimentos:** Os sedimentos podem ser transportados por qualquer um desses agentes: água, ar, gelo, gravidade e organismos. O transporte de sedimentos é afetado de duas formas: (a) altera a forma, o tamanho e a textura das partículas por abrasão, moagem, impacto e solução química; (b) segregação das partículas. O Resumo de alguns efeitos dos 5 meios de transporte pode ser visto na Tabela 3.2.
- (3) **Deposição de sedimentos:** Depois que as partículas do solo foram formadas e transportadas, elas são depositadas para formar um solo sedimentar. As três principais causas de deposição na água são redução da velocidade, diminuição da solubilidade e aumento de eletrólitos. Quando um fluxo alcança um lago, oceano ou outro grande corpo de água, ele perde a maior parte de sua velocidade. Portanto, a sedimentação é resultado da diminuição do fluxo na água. Uma alteração na temperatura da água ou de natureza química pode resultar em uma redução na solubilidade da corrente, com uma precipitação resultante de uma parte da carga dissolvida. A Figura 3.15 ilustra a estrutura do solo em diferentes depósitos e quando é completamente amolgada.

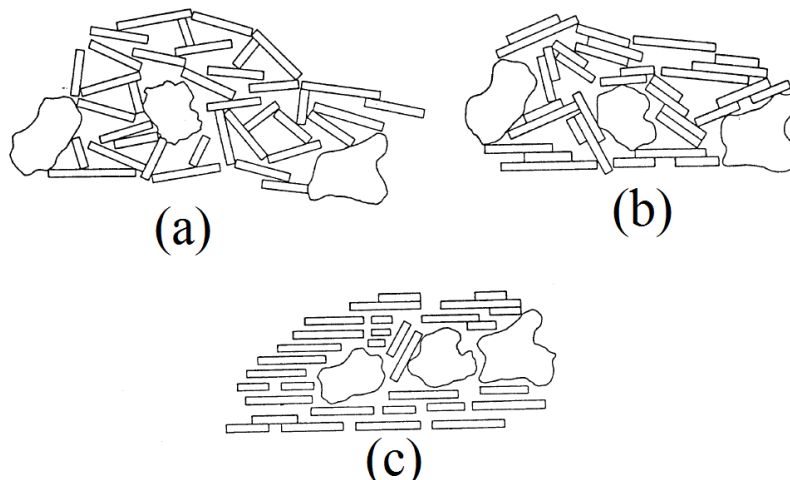
Tabela 3.2: Efeitos do transporte de sedimentação

	Água	Ar	Gelo	Gravidade	Organismos
Tamanho	Redução por solução, pouca abrasão pelo transporte em suspensão, algum abrasão e impacto sob o transporte de tração	Considerável redução	Considerável quebra e impacto	Considerável impacto	Leve abrasão pelo transporte de matéria orgânica
Forma e esfericidade	Arredondamento de areias e pedregulhos	Alto grau de arredondamento	Partículas angulares com a base chata	Angular não-esférica	-
Textura da superfície	Areia: lisa, polida e brilhosa; Silte: pouco efeito	Impacto reproduz superfícies opacas	Superfícies estriadas	Superfícies estriadas	-
Seleção	Considerável seleção	Grande seleção (Progressiva)	Pouca seleção	Sem seleção	Seleção limitada

Fonte: Lambe & Whitman, 1969

As características inerentes a cada processo de transporte e deposição conferem ao solo formado determinadas peculiaridades como o formato dos grãos e o “fabric”. Normalmente, a deposição dos sedimentos dá-se em camadas horizontais, ficando o depósito de solo, por força da superposição das camadas sobrejacentes, submetido ao estado de tensões geostáticas. Oda e Koishikawa (1978) pesquisaram detalhadamente os “fabrics” de amostras indeformadas de rios, praias e areias de dunas. Eles verificaram que estes depósitos “*in situ*” podiam ser caracterizados por “fabric” anisotrópico, devido à orientação preferencial das partículas. Além disto, eles observaram que esta anisotropia podia ser simulada em laboratórios se usado um procedimento adequado.

Figura 3.15: Estruturas de um solo natural em (a) Depósito de água salgada não perturbado; (b) Depósito de água doce não perturbado; e (c) Completamente Amolgada.



Fonte: Lambe & Whitman, 1969

### 3.5.5.3 Solos com “Fabric” artificiais

Nas áreas de pavimento e de barragem de terra é difundida a ideia de se buscar ensaios de laboratório a simulação das características de como solo será compactada no campo. Assim, por exemplo, o ensaio de impacto tipo Proctor em laboratório, corresponde ao uso do rolo de pé pneumático no campo. Do mesmo modo, o ensaio tipo Harvard ou de amassamento tem como seu correspondente no campo o equipamento conhecido como rolo pé de carneiro. No caso de estudo da areia de um filtro de barragem, a técnica de compactação será por vibração, assim, deve ser feito em laboratório o método de preparação de amostras por vibração.

No caso de simulação de fundações em modelos, a técnica de chuva de areia tem sido amplamente utilizada para preparar grandes amostras de areia uniformes para ensaios de estacas em laboratório. Brandon e Clough (1991) sugerem que a técnica de chuva de areia é o método mais eficiente e confiável para a preparação de amostras de solo reprodutíveis em termos de densidade (particularmente para testes de penetração), uma vez que é simples e se assemelha a processos naturais de deposição do solo. Lo Presti *et al.* (1992) também indicaram que o método de chuva de areia é econômico e oferece diversas vantagens em comparação com o método tradicional de mesa vibratória (sem esmagamento de partículas, menos segregação de tamanhos de partículas, maior densidade, melhor uniformidade de densidade e melhor repetibilidade).

### 3.5.6 Limitações e vantagens dos métodos de preparação de amostras

#### 3.5.6.1 Intervalos de valores de compacidade relativa

Nem todos os métodos proporcionam, de maneira fácil e rotineira, a obtenção de uma faixa ampla de compacidade relativa. A Tabela 3.3 mostra as possibilidades a respeito das técnicas de preparação de corpos de prova arenosos até aqui apresentados.

Tabela 3.3: Faixas de Compacidade relativa obtidas a partir dos métodos de preparação de amostras

Método de preparação	Condições de umidade	Faixa de valores de CR (%)	Referências
Pluviação no ar	Seco	30 - 100%	Miura e Toki (1982)
Compactação	Úmido	30 - 80	
Pluviação na água	Saturado	42 - 60	Diversos Pesquisadores
Vibração	Qualquer	Medianamente a muito compacta	

Fonte: Miura & Toki (1982) e Mulilis et al 1977

### 3.5.6.2 Uniformidades

É uma característica importante do método ser capaz de produzir amostras com compacidade uniforme em todo seu volume, evitando-se assim, as desuniformidades que comprometem os resultados. Mulilis *et al.* (1977) apresentam um estudo comparativo a respeito da uniformidade, comparando diversos métodos de preparação de amostras. Este estudo é mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Uniformidade de distribuição da compacidade relativa (%) ao longo da altura da amostra

Camada	Pluviação	Frequência de Vibração		
		Baixa (7 camadas)	Alta (7 camadas)	Alta (1 camada de 180 mm)
1	55	49	50	64
2	56	51	49	46
3	53	50	46	37
4	55	52	55	48
Média	55	50	49	49
Varição	3	3	9	27

Fonte: Mulilis *et al.* 1977

### 3.5.6.3 Reprodutibilidade

Uma vez que a não uniformidade pode ser introduzida no corpo de prova, deve-se ter extremo cuidado ao se preparar as amostras. A reprodutibilidade é de grande importância, pois se refere a capacidade de um método de reproduzir mais de uma vez as mesmas características de compacidade relativa de um corpo de prova. Isto corresponde à verificação do grau de dispersão dos resultados em torno de um valor desejado. Um método será tanto melhor, quanto menor for esta dispersão.

A Tabela 3.5 mostra uma comparação típica de reprodutibilidade e erro humano na compacidade relativa desejada, três técnicos prepararam as amostras de acordo com cada procedimento. Como pode ser visto na Tabela 3.5, procedimentos como os métodos de chuva de areia (MSP e Frasco) e golpeamento levam a erros humanos perceptíveis e exigem uma habilidade tolerável na obtenção de maior reprodutibilidade da compacidade relativa. Também pode ser visto que o método chuva de areia fornece uma maior reprodutibilidade da compacidade do que outros métodos e é bastante livre de erro humano.

Considerando-se o fato de que maiores erros humanos na produção de amostras e menor reprodutibilidade da compactação relativa podem levar à não uniformidade da amostra e à baixa confiabilidade dos resultados do ensaio, pode-se dizer que o método da chuva de areia ar possui vantagens significativas sobre outros métodos possíveis.

Tabela 3.5: Repetibilidade de determinação da compactação relativa (CR) em vários métodos

Método de preparação	Técnico	Número de Amostras	CR Médio (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
MSP (Pluviação no ar, seco)	x	12	55,8	0,78	1,4
	y	13	55,3	0,56	1,0
	z	10	54,9	0,54	1,0
Frasco (Pluviação no ar, seco)	y	10	55,0	2,15	3,9
	z	11	53,6	2,84	5,3
Golpeamento (seco)	x	12	53,9	2,45	4,5
	z	13	55,3	2,10	3,8
Soquete (úmido)	x	11	54,2	1,10	2,0
	y	10	55,4	1,82	3,3
	z	11	55,0	1,43	2,6

Fonte: Miura & Toki, 1982

Em geral, tem-se verificado em um mesmo método, que a dispersão é maior nas baixas compactações relativas (areia fofas) e menor nas densidades altas (areias compactas).

#### 3.5.6.4 Mineralogia

Solos arenosos de composição mineralógica pouco resistente (por exemplo, as areias calcárias) podem contra indicar a utilização de um método de impacto ou mesmo de vibração. Alguma verificação de quebra de grãos deve ser feita no caso do método escolhido ser de impacto ou de vibração e se esteja interessado no comportamento do material “*in situ*”.

#### 3.5.6.5 Granulometria

Alguns métodos são mais sensíveis em induzir a segregação de um solo não uniforme, isto indica que eles não devam ser utilizados com materiais com coeficiente de desuniformidade elevados (Areia mal graduada, areia média ou grossa com silte). Ladd (1978) faz restrições neste sentido ao método de chuva de areia.

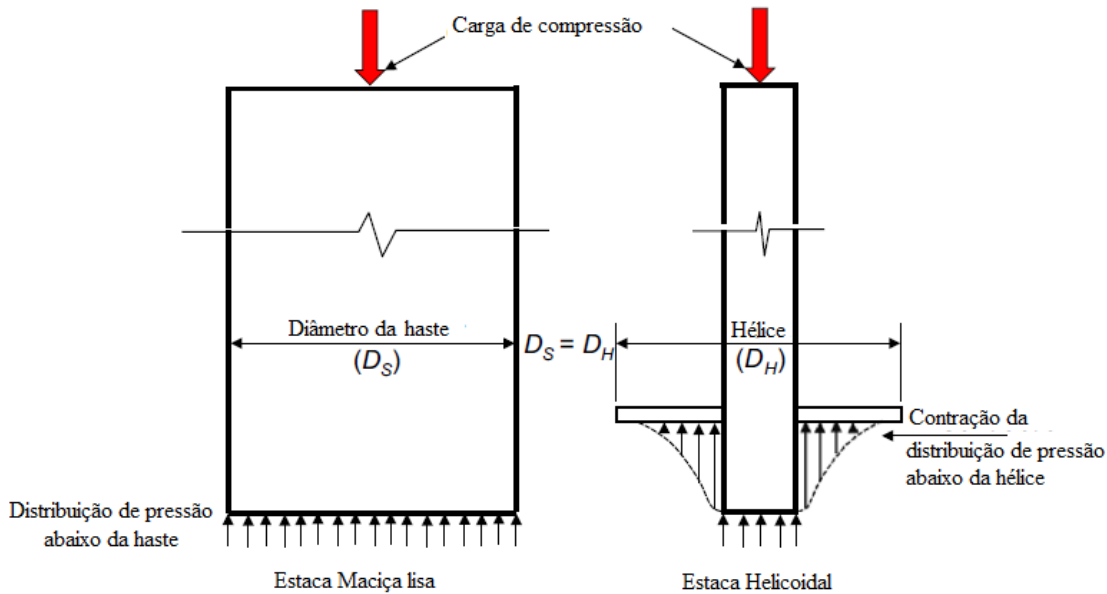
### 3.5.7 Estacas helicoidais em câmara de calibração

Ensaaios com estacas helicoidais em câmara de calibração são raros. Normalmente, encontram-se na literatura internacional ensaios em tanques comuns de pequena escala sem controle das tensões confinantes. Os tanques de aço em que a maioria destes ensaios foram realizados variam de 700 a 1000 mm de altura e 592 a 700 mm de diâmetro interno. Como os tanques ensaiados são pequenos, as estacas são fabricadas em escala reduzida, variando de 500 a 1000 mm de comprimento, com diâmetro da haste de 21.7 a 89 mm e as hélices de 43 a 89 mm.

Um dos trabalhos recentes em câmara de calibração (com controle de tensões confinantes), foi de Malik *et al.* (2016) que investigaram a capacidade de carga à compressão de estacas helicoidais, e compararam com estacas lisas (sem hélice), ambas com ponta fechada e mesma condições do solo. Os testes foram conduzidos em um tanque de pequena escala com areia de Toyoura (compacidade relativa de 70, 80 e 92%) e foi medida a pressão nas bordas do tanque durante os ensaios.

Neste estudo de Malik *et al.* (2016), as camadas de areia foram depositadas com espessura de 100 mm e compactadas até atingir 400 mm de espessura. Nesta profundidade (400 mm) apoiava-se a ponta da estaca e continuava a preencher de solo até atingir 600 mm de espessura. Os resultados do teste indicaram que a sobrecarga vertical aplicada diminuía com o aumento da espessura da camada de solo e concluíram que foi devido ao atrito que se desenvolveu entre a parede do tanque e a areia. A capacidade de carga da estaca helicoidal de pequena escala com uma hélice (extremidade fechada) era em média 16,25% menor do que a estaca de tubular com ponta plana. Essa redução na capacidade de carga final deve-se à distribuição de pressão abaixo da hélice conforme mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16: Distribuição de pressão nas estacas



Fonte: Adaptado de Malik et al 2006

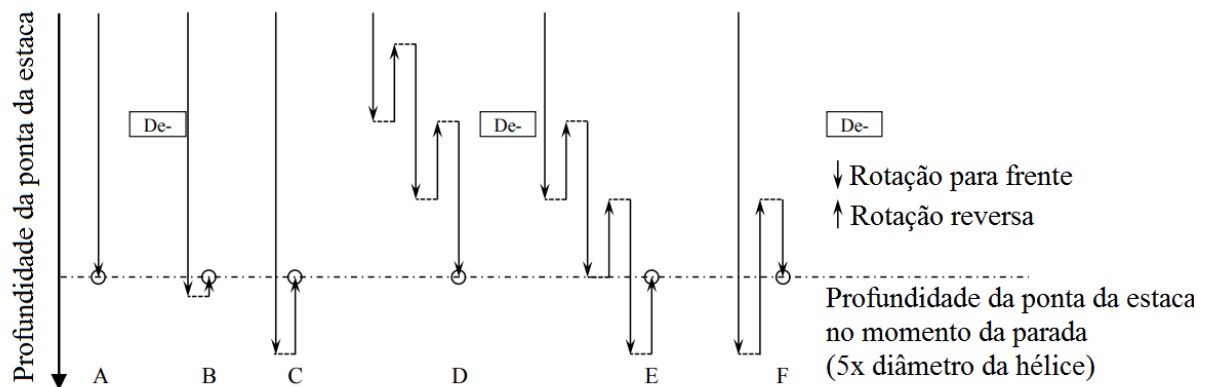
Outro trabalho recente com câmara de calibração foi de Nagai, Tsuchiya e Shimada (2018), eles realizaram ensaios em câmara de calibração (altura de 1,20 m e diâmetro de 1,00 m) e investigaram o processo de instalação e arrancamento da estaca helicoidal em areia. A estaca que eles ensaiaram tinha uma haste de 48,6 mm de diâmetro e a hélice com 97,2 mm. Os casos ensaiados são mostrados na Tabela 3.6. Eles realizaram 12 casos diferentes, sendo 2 condições de solo (fofa e compacta) e 6 métodos distintos de instalação de estaca. O sentido de rotação durante a instalação da estaca e a mudança na profundidade é mostrado na Figura 3.17. Todos os ensaios foram realizados na estaca em profundidade de 5 vezes o diâmetro da hélice (48,6 cm). Estes autores observaram que a ruptura do solo acima da hélice em tração da estaca ocorre em uma forma cilíndrica, e a capacidade de carga à tração da hélice pode ser avaliada considerando-se a mudança na tensão horizontal no solo próximo a ponta da estaca durante a instalação e no arrancamento da estaca.

Tabela 3.6: Casos estudados

Condição do solo	Metodo de instalação	Tensão aplicada no topo da areia
Areia compacta / Areia Fofa	(a) Apenas rotação para a frente	100 KPa
	(b) 1/4 de rotação reversa após rotação para a frente	
	(c) 1 rotação reversa após rotação para a frente	
	(d) Rotação final para a frente após repetida rotação para frente e para trás.	
	(e) Rotação final para trás final após repetida rotação para frente e para trás.	
	(f) Rotação na posição anteriormente passada uma vez após a rotação para frente e reversa.	

Fonte: Nagai, Tsuchiya & Shimada (2018).

Figura 3.17: Métodos de instalação da estaca



Fonte: Nagai, Tsuchiya & Shimada (2018).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são descritas inicialmente as etapas de construção da câmara de calibração e os procedimentos e metodologias usados nos ensaios de caracterização e preparo da amostra de areia utilizada nos ensaios. Após esta parte, são apresentados os procedimentos de instrumentação das estacas modelo usadas na pesquisa. Por fim apresentam-se os procedimentos dos ensaios realizados na câmara de calibração.

Antes da construção da câmara de calibração foi feita uma análise numérica para auxiliar em seu dimensionamento. Os procedimentos adotados nesta análise numérica são detalhados a seguir, antes da parte do capítulo relativa aos procedimentos dos ensaios.



## 4.2 MODELAGEM NUMÉRICA PARA DEFINIÇÕES DAS DIMENSÕES DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

### 4.2.1 Considerações iniciais

Por este se tratar de um primeiro estudo em câmara de calibração na USP/São Carlos, simulações numéricas foram realizadas antes da construção da câmara, com o objetivo de verificar o efeito de borda (da proximidade das paredes do tanque) nos resultados dos ensaios em estacas helicoidais em várias configurações, para definir as dimensões de tanque adequadas e verificar o efeito do furo central da membrana de aplicação de sobrecarga vertical na areia.

As análises numéricas ajudaram a simular o carregamento em tração e em compressão nas estacas modelo, e definir o tamanho ideal da câmara, de modo que não houvesse efeito de borda nos resultados. Além disto, nesta primeira análise também foi utilizada para definir a posição dos *strain-gages* na haste da hélice e os sensores de pressão no solo circundante na estaca.

O *software* utilizado na análise numérica foi o PLAXIS 2D, que é baseado no método dos elementos finitos. No programa, uma vez estabelecidas as condições de contorno do problema, as malhas de elementos finitos são geradas automaticamente. No programa pode-se optar por trabalhar em condição de simetria axial ou deformação plana. Os elementos finitos são do tipo triangular, sendo que se pode fazer a opção de elementos formados por 6 ou 15 nós.

### 4.2.2 Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem numérica

#### 4.2.2.1 Solo de preenchimento – Areia seca do tipo Hostun (HN38)

Para representar o comportamento do solo que iria preencher a câmara de calibração foi escolhido o modelo constitutivo *hardening soil*. Os parâmetros que compõem o modelo foram obtidos a partir de ensaios realizados por Schiavon (2016). O solo estudado por Schiavon (2016) é uma areia seca do tipo Hostun (HN38), com compacidade relativa (CR) de 99%. É uma areia fina de sílica constituída por partículas angulares e que foi extraída na cidade de Hostun na França. A Figura 4.1 lista as principais características deste solo.

Tabela 4.1: Parâmetros da areia tipo Hostun

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Ângulo de atrito*	$\phi_1$	°	48
Ângulo de atrito**	$\phi_2$	°	47
Densidade específica	$G_S$	-	2,64
Peso específico (máx.)	$\gamma_{d(max)}$	kN/m <sup>3</sup>	15,24
Peso específico (mín.)	$\gamma_{d(min)}$	kN/m <sup>3</sup>	11,63
Índice de vazios (máx.)	$e_{max}$	-	1,226
Índice de vazios (mín.)	$e_{min}$	-	0,699
Diâmetro médio dos grãos	$d_{50}$	mm	0,12

\*Ensaio de cisalhamento direto

\*\*Ensaio triaxiais

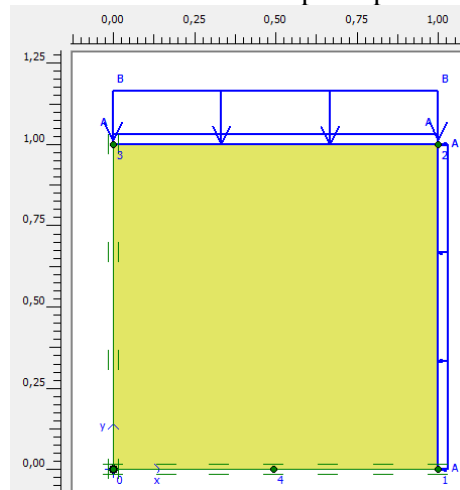
Fonte: Schiavon, 2016.

#### 4.2.2.2 Calibração do modelo por meio da simulação numérica dos ensaios triaxiais

Para a calibração dos parâmetros dos solos utilizados no modelo numérico, foram simulados ensaios de compressão triaxial no PLAXIS versão 8.5. Comparando o melhor ajuste entre os resultados numéricos obtidos e as curvas experimentais apresentadas em Schiavon (2016) foi possível encontrar os parâmetros de resistência e rigidez do solo para serem utilizados como dados de entrada (*input*) da modelagem numérica.

Na simulação foi adotado o modelo axissimétrico, um corpo de prova de 1 metro de diâmetro e 1 metro de altura (Figura 4.1). A dimensão do modelo triaxial da Figura 4.1 não é realista, mas foi selecionado por simplicidade. A dimensão do modelo não influencia nos resultados, desde que o peso do solo não seja levado em consideração. Nesta configuração, as tensões e deformações são distribuídas uniformemente sobre a geometria. A tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) foi aplicada no topo e na borda direita do corpo de prova. Para simular o carregamento, foi aplicada uma tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) no topo do corpo de prova.

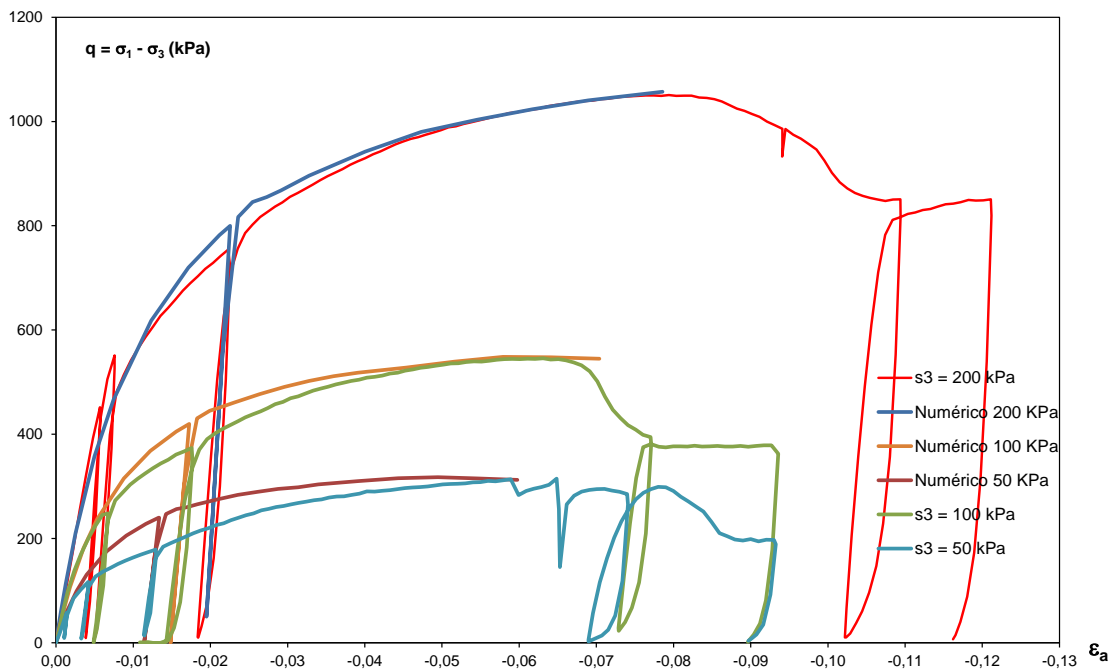
Figura 4.1: Geometria utilizada no corpo de prova no PLAXIS 8.5



Fonte: Autor.

A Figura 4.2 apresenta o melhor ajuste obtido entre os resultados das simulações e os resultados experimentais dos ensaios triaxiais para as tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa.

Figura 4.2: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos ensaios triaxiais para: (a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, (b)  $\sigma_3 = 100$  kPa; e (c)  $\sigma_3 = 200$  kPa



Fonte: Autor.

A partir dos resultados numéricos mostrados na Figura 4.2 foram obtidos os parâmetros de resistência e rigidez apresentados na Tabela 4.2, a seguir:

Tabela 4.2: Parâmetros usados na simulação dos ensaios triaxiais

$\sigma_3$ (kPa)	$E_{50}^{ref}$ (MPa)	$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)	$\nu$	$c$ (kPa)
50	40	52	173	46,9	17	0,3	0
100	40	52	173	46,7	15,5	0,3	0
200	40	52	173	46,2	15	0,3	0

Fonte: Autor

$E_{50}^{ref}$  é o parâmetro de entrada do módulo de elasticidade secante do solo,  $E_{oed}^{ref}$  é o parâmetro de entrada do módulo de elasticidade no carregamento eodométrico,  $E_{ur}^{ref}$  é o parâmetro de entrada módulo de elasticidade do solo no descarregamento (triaxial),  $\phi$  é o ângulo de atrito,  $\psi$  é o ângulo de dilatação,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $c$  é o intercepto coesivo. Estes parâmetros foram utilizados no modelo numérico para simular o comportamento da areia indeformada durante o carregamento da estaca helicoidal.

Em resistência dos materiais, sabe-se que o módulo de elasticidade é dependente das tensões ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ). No entanto, no manual do Plaxis é indicado que o parâmetro de entrada  $E_{50}^{ref}$  seja constante, pois ele calcula através da fórmula:  $E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m$ .

Outra coisa importante que vale chamar atenção é sobre o ângulo de atrito ( $\phi$ ). Sabe-se que ele não é dependente da tensão e nem densidade inicial do solo, mas, neste caso, para o melhor ajuste do modelo, foram feitas variações no ângulo de atrito para tentar achar o melhor comportamento na curva tensão x deformação.

#### 4.2.2.3 Propriedades dos materiais e modelo constitutivo

O modelo numérico realizado envolve 2 materiais principais: o aço para estaca helicoidal e a areia para o solo (indeformada e deformada). Para o aço é utilizado o modelo elástico linear. As propriedades do aço consideradas no modelo numérico são mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades da estaca helicoidal (Aço)

Propriedade do Aço	Unidade	Símbolo	Valor numérico
Módulo de elasticidade	GPa	$E$	200
Coefficiente de Poisson	-	$\nu$	0,15
Peso específico	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	70

Fonte: Autor.

Como dito anteriormente, o solo foi simulado considerando-se o modelo constitutivo *Hardening soil*, o qual é baseado no modelo Mohr-Coulomb (MC). O modelo MC assume que a plastificação ocorre quando a tensão cisalhante em qualquer ponto do material atinge um valor que depende linearmente da tensão normal em um mesmo plano. O manual do Plaxis (PLAXIS, 2004) recomenda que este modelo (MC) seja usado apenas como uma primeira análise do problema, porque é uma análise numérica relativamente rápida e para obter uma primeira impressão das deformações. No modelo Hardening-Soil (HS) como no Mohr-Coulomb (MC) os estados limites de tensão são descritos pelo ângulo de atrito ( $\phi$ ), coesão ( $c$ ) e ângulo de dilatância ( $\psi$ ). Porém, a rigidez do solo é descrita com mais acurácia, ou seja, usando 3 tipos diferentes de módulo de elasticidade ( $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  e  $E_{oed}^{ref}$ ). Em contraste com o modelo Mohr-Coulomb, o modelo Hardening-Soil também conta com a dependência da tensão do módulo de elasticidade. Isto significa que toda a rigidez aumenta com a tensão. As propriedades mecânicas do solo intacto foram consideradas com base na calibração dos ensaios triaxiais apresentada no item anterior. A Tabela 4.4 mostra os parâmetros considerados na simulação numérica do solo intacto.

Tabela 4.4: Propriedades do solo intacto

Propriedade do Solo intacto	Unidade	Símbolo	Valor numérico
Módulo de elasticidade	MPa	$E_{50}^{ref}$	40
	MPa	$E_{oed}^{ref}$	52
	MPa	$E_{ur}^{ref}$	173
Coefficiente de Poisson	-	$\nu$	0,3
Ângulo de atrito	°	$\phi$	46,7
Dilatância	°	$\psi$	15,5
Coesão	kPa	$c$	0
Peso específico	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	14,29

Fonte: Autor.

O ângulo de atrito de pico obtido na calibração dos ensaios triaxiais para as três tensões de confinamento apresentou um valor médio de  $46,7^\circ$ . Nos ensaios realizados por Schiavon (2016) na mesma areia, foi encontrado o valor de  $46,8^\circ$ . Com base nestes resultados, o ângulo de atrito do solo intacto foi considerado  $46,7^\circ$ . A dilatância adotada também foi obtida na calibração dos ensaios triaxiais para as três tensões de confinamento apresentou um valor médio de  $15,5^\circ$ . Como o solo analisado é areia pura foi considerado que o intercepto coesivo é igual a zero.

Os módulos de elasticidade foram obtidos através do melhor ajuste da curva do ensaio triaxial realizado por Shiavon (2016) e da simulação numérica conforme explicado no item 4.2.2.1 e mostrado na Figura 4.2.

As propriedades mecânicas do solo perturbado pela instalação da estaca foram considerados com base no estudo de Pérez (2017) e através da envoltória de Lambe. A Tabela 4.5 mostra os parâmetros considerados na simulação numérica do solo perturbado.

As propriedades mecânicas do solo perturbado pela hélice foram estabelecidas pela redução dos parâmetros de resistência e rigidez do solo. Pérez (2017) realizou várias análises paramétricas variando o ângulo de atrito e o módulo de elasticidade até atingir uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. O módulo de elasticidade encontrado para o solo perturbado acima das hélices foi de 80% do módulo de elasticidade do solo intacto, que pode ser considerado como uma boa representação desta areia no estado fofo.

Tabela 4.5: Propriedades do solo perturbado

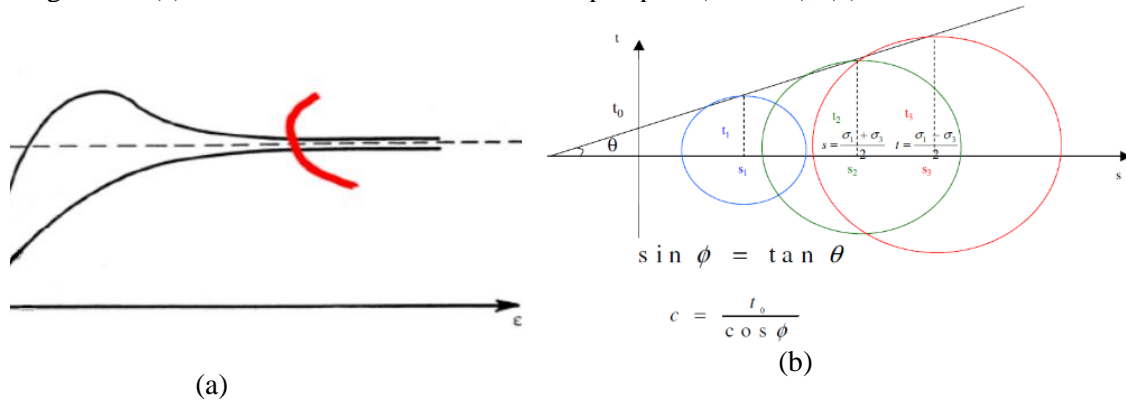
Propriedade do Solo perturbado pela instalação	Unidade	Símbolo	Valor numérico
Módulo de elasticidade	MPa	$E_{50}^{ref}$	32
	MPa	$E_{eod}^{ref}$	41,6
	MPa	$E_{ur}^{ref}$	138,4
Coefficiente de Poisson	-	$\nu$	0,3
Ângulo de atrito	$^\circ$	$\phi$	37,7
Dilatância	$^\circ$	$\psi$	0
Coesão	kPa	$c$	0
Peso específico	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	11,63

Fonte: Autor

Para determinação do ângulo de atrito do solo perturbado pela hélice foi considerado o ângulo de atrito residual. Para isto, utilizou-se a tensão pós-pico para os três ensaios triaxiais (50, 100 e 200 kPa) como mostra a Figura 4.3(a). Em seguida plotou-se um gráfico com os

eixos de lambe para a determinação do ângulo de atrito residual (Figura 4.3b). O ângulo de atrito residual encontrado foi de  $37,7^\circ$ .

Figura 4.3:(a) Gráfico  $\sigma \times \varepsilon$  mostrando o trecho pós-pico (residual); (b) Eixos de Lambe



Fonte: Lambe & Whitman, 1967

Aqui vale uma outra ressalva quanto aos valores utilizados de ângulo de atrito na areia intacta e na areia perturbada pela hélice. Embora o ângulo de atrito usado na areia perturbada pela hélice seja menor nas análises numéricas, fisicamente o que diminui é a parcela da dilatância. Nos trabalhos de Lee e Seed (1967) e Bolton (1986) mostraram que o ângulo de atrito para uma determinada areia não muda, o que muda é justamente a parcela da dilatância.

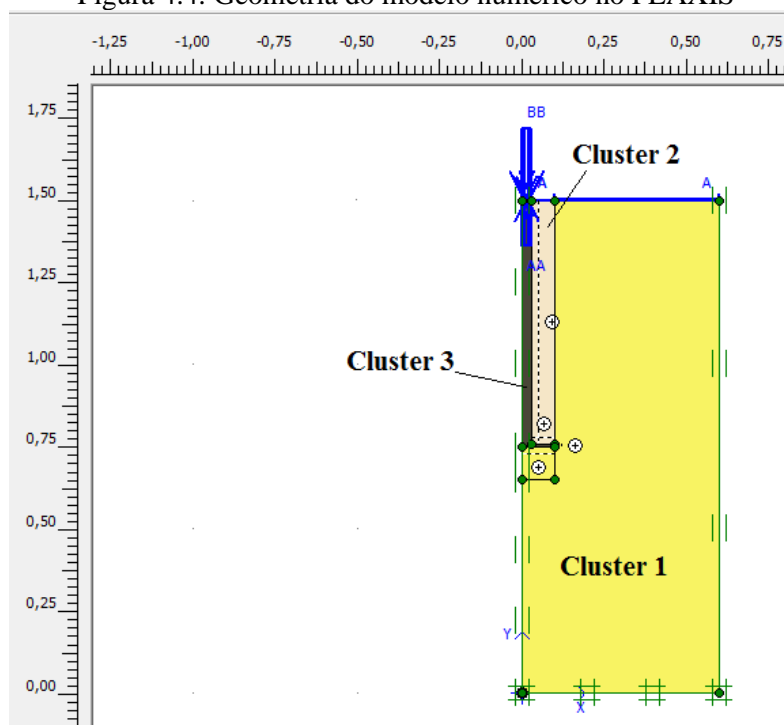
#### 4.2.3 Estudo numérico da estaca helicoidal de única hélice instalada em areia

##### 4.2.3.1 Geometria do modelo

As simulações numéricas foram realizadas por meio de um modelo bidimensional axissimétrico, sendo utilizada metade da geometria, com o eixo vertical de simetria passando pelo centro da haste da estaca, como mostrado na Figura 4.4.

A geração da malha foi feita através do comando “*generate mesh*” e para uma primeira análise foi utilizada a opção “*coarse*” para todas as geometrias (solo, haste, hélice etc.). Assim que foram estabelecidos os parâmetros definitivos a ser utilizado nas análises foi utilizada a opção “*fine*” para todas as geometrias (solo, haste, hélice etc.).

Figura 4.4: Geometria do modelo numérico no PLAXIS



Fonte: Autor.

As condições de contorno foram estabelecidas através do comando “*standart fixies*”. O topo do modelo, o qual está localizado em  $y = 1,50$  metros é uma superfície livre. Nas laterais do modelo (eixo de simetria e na borda circular do tanque) foi fixada a direção  $x$ , ou seja, não há deslocamento na direção  $x$ , apenas na direção  $y$ . Na base do modelo é uma face fixa nas duas direções ( $x$  e  $y$ ).

A malha que representa o maciço de solo foi dividido em 3 “*clusters*” com base na geometria apresentada na Figura 4.4. O Cluster 1 representa o solo natural, ou seja, que não é perturbado pela instalação da estaca helicoidal. O Cluster 2 representa o solo acima da hélice com características de solo fofo por conta da instalação da estaca. Por último, o cluster 3 representa a estaca helicoidal que irá exercer uma força de compressão no solo abaixo da hélice e uma força de tração no solo acima da hélice após a instalação da mesma.

#### 4.2.3.2 Análise numérica

A análise numérica realizada compreende 3 etapas: (1) inicialização das tensões com a estaca helicoidal instalada (interação solo-estaca), (2) “Arrancamento” da estaca através de um ensaio de tração; e (3) compressão da estaca. Após estabelecer a geometria do modelo, definir os parâmetros e o modelo constitutivo do solo e da estaca, inicia-se com a etapa 1.



Na primeira etapa foram especificadas as tensões iniciais após a instalação da estaca, de modo que foi “ativada” a tensão atuante no topo da câmara de calibração e a interface entre a estaca e o solo deformado. Para interface, foi utilizada o valor de  $R_{inter} = 0,650$  no solo deformado. Foi simulado 4 tipos de modelos, (1) Sem confinamento, ou seja, foi ativado apenas a interação solo-estaca; (2) a tensão de 50 kPa atuando no topo da camada de solo; (3) 100 kPa atuando no topo da camada; e (4) 150 kPa, que será a tensão máxima aplicada nos ensaios reais.

Na segunda etapa, para simular a prova de carga a tração foi aplicada uma carga distribuída em forma de tensão [Plaxis considera tração (+)] no topo da estaca para simular o “arrancamento” da estaca. Para isto, foram simuladas várias tensões, e em cada simulação foi aumentada a tensão de tração até que determinasse a tensão limite máxima em que a solo não sofresse a ruptura. Como o PLAXIS (Elementos Finitos) simula apenas o estado limite de serviço, ou seja, não simula a ruptura, esta etapa teve que ser simulada.

Na terceira etapa, para simular a prova de carga a compressão foi aplicada uma carga distribuída em forma de tensão negativa [Plaxis considera compressão (-)] no topo da estaca para simular o carregamento da estaca. Para isto, foram simuladas várias tensões, e em cada simulação foi aumentada a tensão de compressão até que determinasse a tensão limite máxima em que a solo não sofresse a ruptura.

#### 4.2.4 Considerações iniciais dos resultados e análises

Estas análises foram feitas para a definição das dimensões da câmara de calibração e das dimensões da bolsa de reação (furo central). Aqui só foi apresentado o resultado final para a câmara de calibração com altura de 1,50m e 1,20m de diâmetro. As análises e resultados variando a dimensão da câmara de calibração foi abordado na qualificação do autor.

No item 4.2.4.1 são apresentados os resultados dos modelos numéricos realizados para avaliar a influência da dimensão do furo central da membrana de aplicação de sobrecarga na amostra de solo (espaço central para passagem da haste da estaca) nas tensões na parte superior da amostra do solo.

Foram também realizadas simulações do comportamento carga-deslocamento da estaca, considerando-se o efeito de instalação, para avaliar a influência da dimensão da câmara de calibração (efeito de borda). Os resultados destas análises são mostrados no item 4.2.4.1.

#### 4.2.4.1 Influência do furo central da membrana

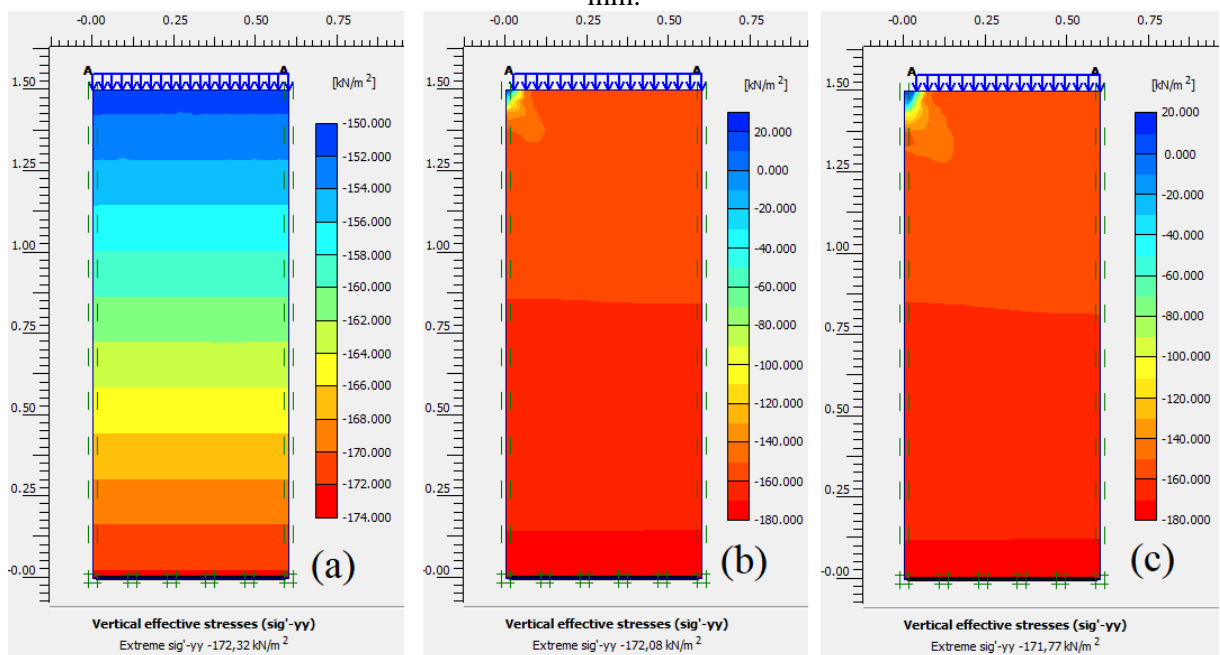
Para avaliar o efeito do tamanho do furo central da membrana nos resultados dos ensaios foi realizada inicialmente uma simulação onde todo o topo da camada de areia estava sob a compressão de 150 kPa. Esta tensão foi escolhida, pois foi a máxima tensão aplicada na amostra de areia nesta tese. A câmara de calibração tem 1,50 metros de altura e 1,20 metros de diâmetro. Por se tratar de um modelo axissimétrico, a geometria a ser desenhada no PLAXIS 8.5 foi de 1,5m de altura e 0,6 m de diâmetro.

A Figura 4.5 mostra a influência nas tensões verticais, e a Figura 4.6 nas tensões horizontais dos casos com membrana de furo central com diâmetro de 50 mm e de 75 mm, e sem furo central (toda a amostra sendo carregada).

A aplicação de 150 kPa consiste em simular uma estaca instalada com a hélice em areia muito compacta a aproximadamente 8,5 metros de profundidade (considerando  $\gamma = 17,6$  kN/m<sup>3</sup>). A Figura 4.5(a) mostra como seria as tensões geostáticas do solo antes da estaca instalada. Pode-se perceber que quanto maior o diâmetro do furo central, maior é a redução das tensões verticais na zona abaixo do furo.

O furo da membrana causa uma redução nas tensões verticais na zona central da amostra até a profundidade de 150 mm e 225 mm para os casos de diâmetro de 50 mm e 75 mm, respectivamente.

Figura 4.5: Tensão vertical atuante quando (a) sem furo central; (b) raio de 25 mm e (c) raio de 37,5 mm.

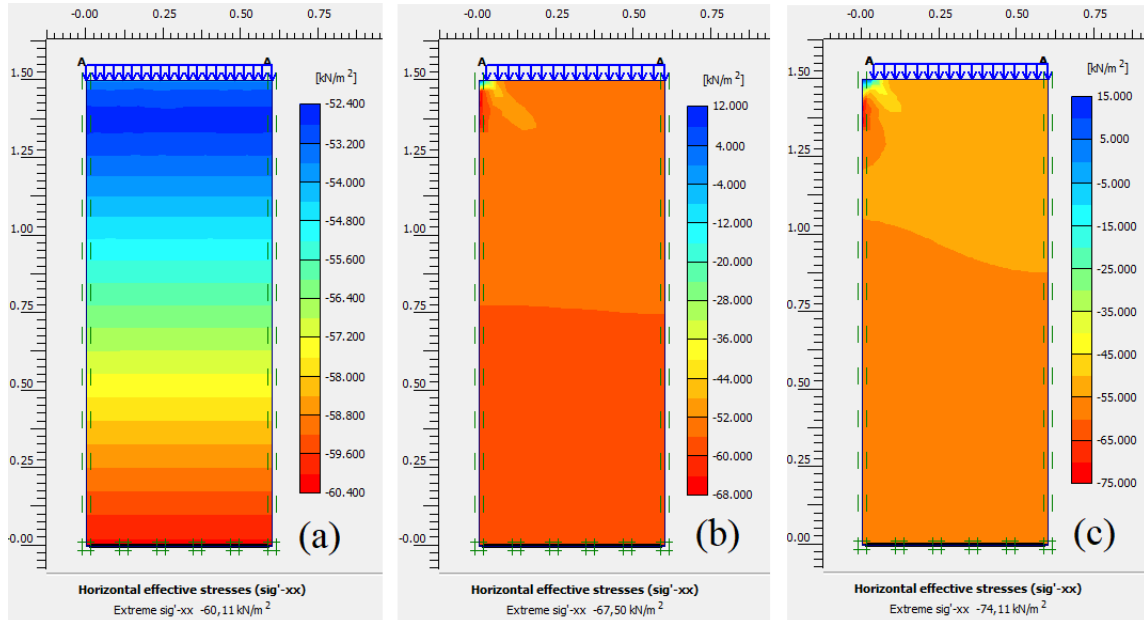


Fonte: Autor.

Na Figura 4.6(a) mostra como seria as tensões geostáticas do solo antes da estaca instalada. O cálculo da tensão horizontal é realizado pelo programa PLAXIS 8.5 através da formula de “Jaki” ( $K_0 = 1 - \text{sen}\phi$ ). Pode-se perceber que quanto maior o diâmetro do furo central, maior é a redução das tensões horizontais na zona abaixo do furo. Para o furo de diâmetro de 50 mm, existe uma redução das tensões horizontais (radiais) de  $z=0$  até 150 mm e  $r=0$  até 200mm ( $r =$  raio da câmara). Para o furo de diâmetro de 75 mm, existe uma redução da das tensões horizontais de  $z=0$  até 300 mm e  $r=0$  até 125mm.

Essas simulações foram muito importantes para ajudar na decisão sobre a profundidade mínima necessária para instalar a placa helicoidal da estaca do modelo (nos testes de tração) para evitar qualquer efeito do furo central da membrana. A influência do furo central da membrana nas tensões na amostra de areia mostradas nas Figura 4.5 e Figura 4.6 indicaram que uma membrana com o furo central de diâmetro entre 50 e 75 mm é adequada para os ensaios. Portanto, essa faixa de diâmetro para o furo central da membrana foi escolhida para a realização dos ensaios da tese.

Figura 4.6: Tensão horizontal atuante quando (a) sem furo central; (b) raio de 25 mm e (c) raio de 37,5 mm.



Fonte: Autor.

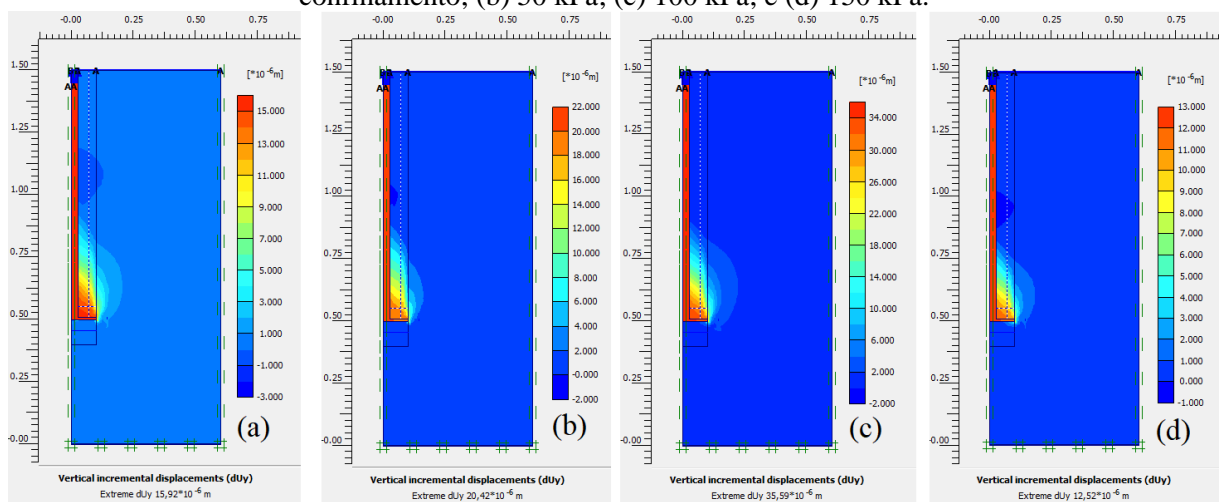
#### 4.2.4.2 Comportamento carga-deslocamento nos ensaios de carregamento, considerando-se o efeito de instalação da estaca e a influência do tamanho da câmara

Após a instalação da estaca helicoidal, uma zona cilíndrica de solo é afetada pela passagem da hélice. Visto que não é conhecido o grau de perturbação do solo atravessado, foram estimados os parâmetros de um solo perturbado descritos no capítulo 4 na Tabela 4.5. Os parâmetros do solo perturbado foram reduzidos em relação aos do solo intacto.

Para a avaliação da influência do tamanho da câmara de calibração escolhida nos resultados das provas de carga à tração e à compressão, os contornos dos deslocamentos verticais e horizontais foram examinados numericamente pelo modelo constitutivo *Hardening soil*. Foram simulados 4 tipos de modelos: (1) sem sobrecarga aplicada na amostra de solo; (2) sobrecarga de 50 kPa no topo da amostra de solo; (3) sobrecarga de 100 kPa no topo da amostra de solo; e (4) sobrecarga de 150 kPa no topo da amostra de solo, que será a sobrecarga máxima aplicada nos ensaios reais. Uma placa helicoidal de 200 mm de diâmetro (maior do que os valores de diâmetro usada nos ensaios) foi adotada para as simulações.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 mostram os deslocamentos verticais e horizontais sofridos pela estaca e pelo solo durante aplicação de tração na estaca para as tensões especificadas acima. A Figura 4.9 e a Figura 4.10 mostram os deslocamentos verticais e horizontais sofridos pela estaca e o solo durante aplicação de compressão para as tensões especificadas acima.

Figura 4.7: Contornos de deslocamentos vertical durante o “arrancamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.

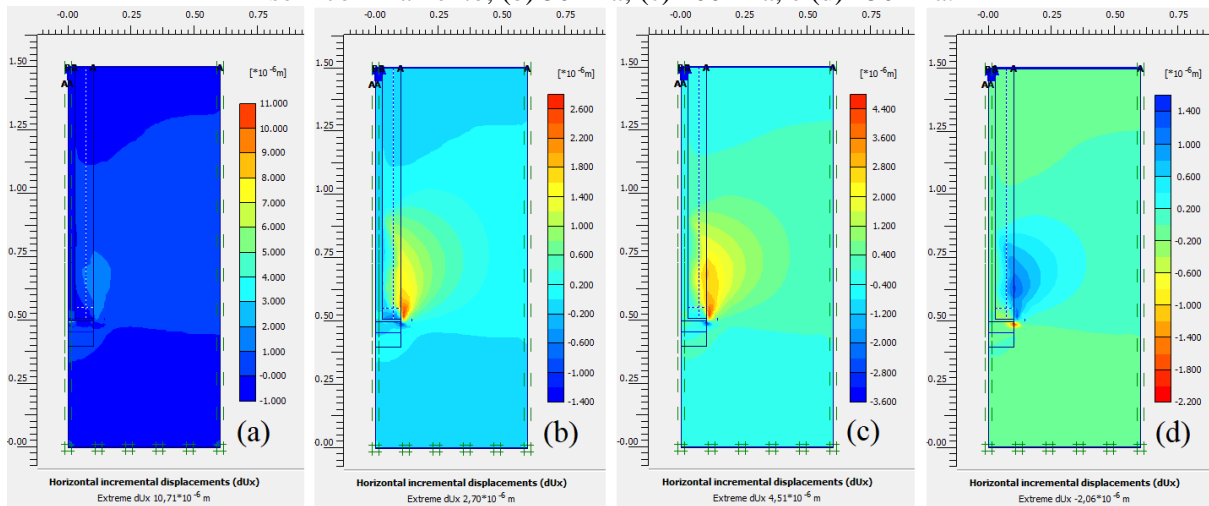


Fonte: Autor.

Como esperado, com o aumento da sobrecarga no topo da amostra (simulando o aumento da profundidade) os deslocamentos verticais na zona de solo acima da placa

diminuem. Pode-se verificar que os maiores deslocamentos se concentram dentro do cilindro de solo perturbado pela instalação. Em todos os casos os deslocamentos não atingem as bordas e a tampa da câmara de calibração.

Figura 4.8: Contornos de deslocamentos horizontais durante o “arrancamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.

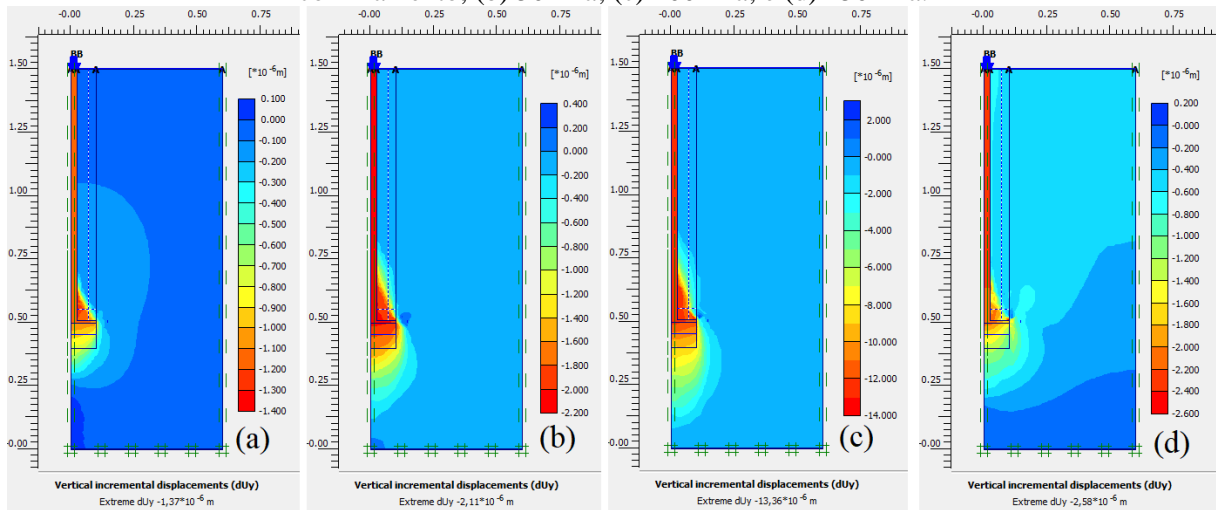


Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 4.8, verifica-se que há uma concentração de deslocamento horizontal no solo perturbado (cilindro de solo acima da placa) e no solo intacto, em zona logo acima do nível da placa. Para os casos de sobrecarga aplicada de 100 e 150 kPa os deslocamentos alcançam as bordas da câmara de calibração, no entanto, esses deslocamentos são muito pequenos ( $0,8 \times 10^{-3}$  mm) e podem ser considerados insignificantes, ou seja, borda da câmara não irá afetar no ensaio.

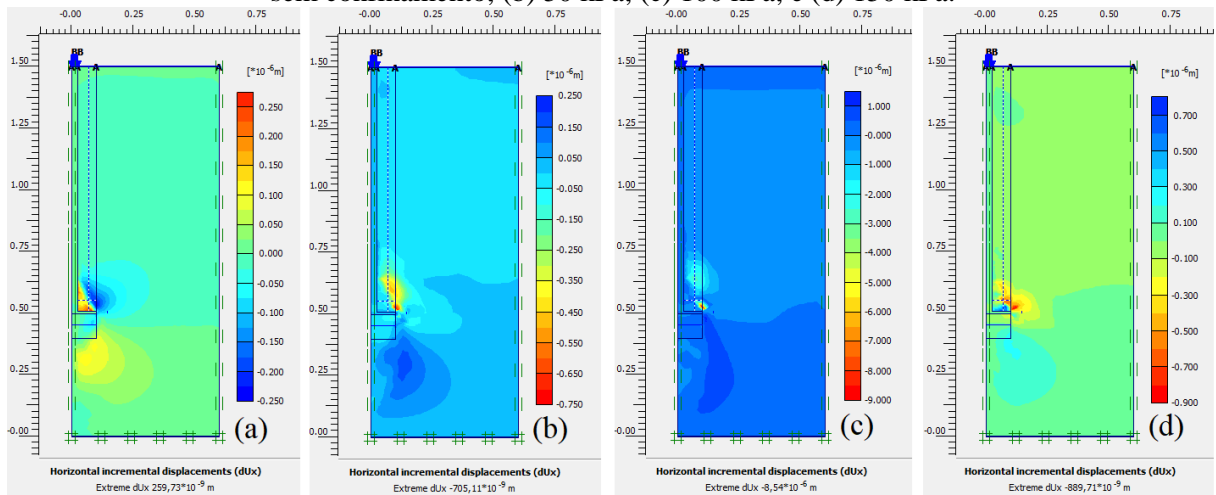
As Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram os deslocamentos verticais e horizontais causados pela aplicação de compressão aplicada na estaca helicoidal. A Figura 4.9 mostra que os maiores deslocamentos ocorrem abaixo da placa helicoidal, como esperado para um teste de compressão. Em todos os casos, os deslocamentos não atingem a base da câmara de calibração.

Figura 4.9: Contornos de deslocamentos verticais durante o “carregamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.



Fonte: Autor.

Figura 4.10: Contornos de deslocamentos horizontais durante o “carregamento” da estaca quando (a) sem confinamento; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; e (d) 150 kPa.



Fonte: Autor.

A Figura 4.10 indica uma concentração de deslocamentos horizontais abaixo da placa helicoidal. Com o aumento da sobrecarga na areia, os deslocamentos horizontais aumentam. Os maiores deslocamentos estão concentrados abaixo da placa helicoidal na zona de solo não perturbado na forma de uma “gota de água” (Figura 4.10(a) em amarelo e Figura 4.10(b), em azul). Em todos os casos os deslocamentos que chegam às bordas laterais e no fundo da câmara de calibração são muito pequenos, considerando-se insignificante este deslocamento e a borda da câmara não irá afetar no ensaio.

Portanto, para esta câmara de calibração e as configurações de estaca modelo avaliada, em que a distância entre a parte inferior da câmara e a placa helicoidal é 2,5 vezes o diâmetro da hélice, e a distância horizontal entre a borda da placa e a parede da câmara é também é 2,5

vezes o diâmetro da hélice, a borda da câmara parece não afetar os resultados das provas de carga.

#### 4.2.4.3. Conclusões sobre os resultados numéricos:

As simulações numéricas realizadas mostraram que para a dimensão da câmara de calibração investigada: (1) a membrana pressurizada com um furo central inferior a 75 mm de diâmetro é adequada para os testes em modelos de estacas helicoidais; (2) para sobrecargas no topo da amostra de areia de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, não há influência da dimensão da câmara de calibração para uma estaca com uma placa helicoidal de 200 mm. Portanto, com base nestas análises pode-se afirmar que a câmara de calibração de 1,20 m de diâmetro e 1,50 m de altura é adequada para realizar ensaios de carregamento em modelos de estaca helicoidal com hélices de até 200 mm de diâmetro. A bolsa de reação (membrana) usada nos ensaios foi feita com furo central de 65mm de diâmetro, ou seja, entre os valores de 50 e 75 mm simulado nas análises numéricas para verificar os efeitos de borda.

### 4.3 MONTAGEM DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

#### 4.3.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento da câmara de calibração da EESC/USP foi baseado nas seguintes ideias: (1) ser simples; (2) a amostra de solo deveria ser grande o suficiente para evitar os efeitos de borda nos resultados, evitando a necessidade de controles de fronteira laterais sofisticados; (3) o custo deveria caber dentro do valor disponível no momento da construção (R\$ 42.000).

Para implementar os preceitos estabelecidos acima, foi decidido que a melhor solução seria projetá-la para funcionar de maneira independente, com o sistema de instalação e a estrutura de reação das estacas teste aparafusado e fixado na tampa. Neste conceito, na amostra de solo, a tensão confinante vertical seria aplicada por uma grande membrana flexível no topo, com as disposições de aplicar de forma independente as tensões de confinamento vertical na amostra e a realização da prova de carga. Com isto, garante-se que não ocorra deslocamento do tanque em relação à amostra.

Levando-se em consideração a revisão bibliográfica com a descrição de algumas das câmaras de calibração até hoje construídas no mundo, e as dimensões de uma estaca helicoidal, o conjunto da câmara que foi montado é basicamente constituído de: (1) câmara de calibração;

(2) sistema de deposição de areia através da “chuva de areia” (“Chuveiro”); (3) sistema de instalação da estaca e estrutura de reação; (4) sistema para aquisição de dados; e (5) acessórios diversos. Nos itens 4.3.2 a 4.3.6, a seguir, é feita uma breve descrição e a importância de cada item citado a cima.

#### 4.3.2 Câmara de calibração

##### 4.3.2.1 Considerações iniciais

Devido ao seu tamanho finito, as câmaras de calibração não reproduzem as condições perfeitamente infinitas lateralmente de campo. Este fato pode propiciar as medições feitas numa amostra de areia dentro de uma câmara de calibração diferentes do que seria observado no campo para uma mesma compactidade relativa e estado de tensões. Estas dificuldades tendem a ser mais pronunciadas quanto menor a câmara.

Segundo Lee e Salgado (2000), os efeitos das dimensões da câmara de calibração têm sido extensivamente estudados em ensaios de cone (CPT), onde ocorrem grandes deformações, e foi observado que os efeitos das dimensões da câmara são mais significativos em areias compactas do que em areias fofas.

Segundo O’Neill (1991), para os testes em estacas, existem condições de tamanho conflitantes. Por um lado, é desejável a utilização de estaca grande o suficiente, a fim de modelar processos de difusão durante a cravação e manter um modelo razoável para o protótipo em relação do diâmetro da estaca com o diâmetro das partículas do solo. Para a maioria das aplicações em projetos, é suficiente assegurar que os resultados dos testes em câmaras sejam conservadoras. A partir desta perspectiva, O’Neill (1991) cita que Wang (1985) analisou a penetração de penetrômetro de ponta esférica em um solo não-dilatante e não-contrativo usando um procedimento de caminho de deformações descrita por Baligh (1984), e concluiu que a zona plástica em torno do penetrômetro seria confinado dentro de uma zona de cerca de 5 raios do penetrômetro. Em solos ligeiramente dilatantes, essa zona se estenderia para 7,5 a 8 raios.

Ainda com base na análise de Wang (1985), que testou também estacas tubulares em câmara com 100 mm de diâmetro, O’Neill (1991) descreve que tem sido prática generalizada instalar estacas com a distância de 5 diâmetros da estaca acima da base da câmara (estacas testadas em compressão). Baseando-se em experiência com estacas em escala real, as propriedades do solo em torno de 5 diâmetros abaixo da base têm pouco efeito sobre a resistência de ponta da estaca.



De acordo com a recomendação de Salgado *et al.* (1998), recomenda-se que as condições BC1 ou BC3 sejam utilizadas em câmaras de calibração em ensaios de placa. Por conta disto, os ensaios nesta tese foram realizados com uma membrana para aplicação de pressão no topo da amostra.

#### 4.3.2.2 Fabricação do tanque de aço

Com base nas informações do item anterior, e após a leitura de vários artigos relacionados a ensaios realizados em câmara de calibração, e o estudo dos efeitos do tamanho da câmara através de análises numéricas (conforme item 4.2), a câmara de calibração (Figura 4.11) foi fabricada pela empresa Pepthus Usinagem, que calandrou uma chapa de aço com 1” (25,4mm) de espessura, no diâmetro de 1,20 metros, e com altura de 1,50 metros. Para reforçar o tanque da câmara de calibração foi soldado horizontalmente na câmara uma tira de chapa de 1” de espessura em 3 níveis equidistantes de 250 cm. Adicionalmente, a estas tiras de aço foram soldados nervos verticais (Figura 4.11). O tanque da câmara foi instalado com a base a 2 metros abaixo da superfície do terreno da área experimental de fundações da EESC para fins práticos.

Figura 4.11: Foto da câmara de calibração e da tampa sem a pintura



Fonte: Autor.

O tanque foi pintado (Figura 4.12) com tinta antioxidante de níquel antes da instalação do mesmo para que se possa evitar corrosão. Na parte interna do tanque, tanto na parede lateral quanto na base, foi utilizada uma camada de borracha, tendo a função de uniformizar a distribuição de tensões e servir de molde para o corpo de prova. Entre o tanque de aço e a manta de borracha, foi colocada graxa de silicone, para que, durante o carregamento da bolsa de reação, a manta de borracha deslocasse junto com a amostra de areia, evitando atrito na parede

do tanque. Para que a manta de borracha ficasse fixa durante o preparo da amostra de areia para o ensaio, alguns ímãs de neodímio cilíndricos (10mm x 5mm) foram usados para fixá-la na parede do tanque.

Figura 4.12: Foto da chegada da câmara de calibração pintada e com a manta de borracha



Fonte: Autor.

#### 4.3.3 Sistema de deposição de areia através da “chuva de areia” (“Chuveiro”)

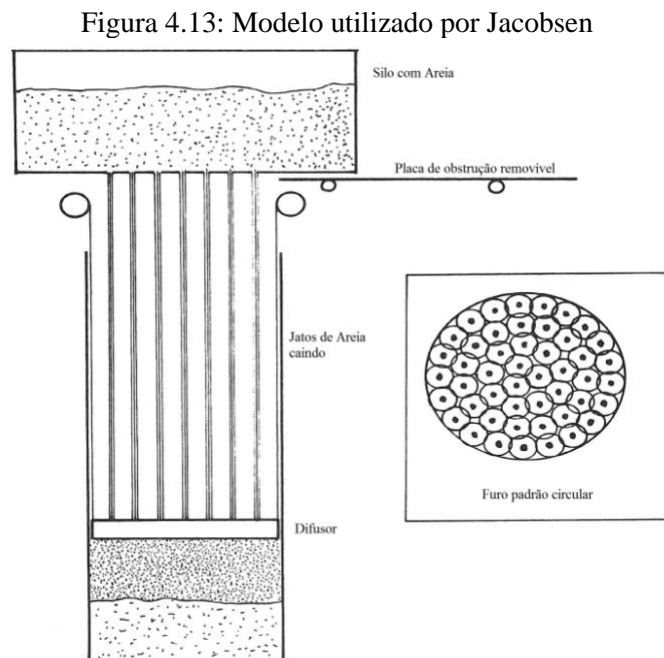
##### 4.3.3.1 Considerações Iniciais

O método de deposição por chuva de areia utilizado para a reconstituição de maciço é baseado no estudo de Jacobsen (1976) que era composto por três componentes: recipiente de armazenagem de areia, uma placa de fundo denominada pelo autor de “*Rainer*” e um dispositivo difusor. Este sistema de simular a chuva de areia é muito importante, pois, a partir dele que foi feita a moldagem da amostra de areia no interior da câmara de calibração, com a compacidade relativa desejada.

Para o preparo da amostra, a areia é colocada dentro do recipiente de armazenagem de areia que irá estocar a areia até o início da chuva de areia. A placa de fundo “*Rainer*” contém vários furos usinados, o diâmetro e espaçamento podem ser variados para se obter diferentes densidades de areia. Seguindo as recomendações de Jacobsen (1976), Sweeney e Clough (1990) reproduziram em seus estudos, compacidades relativas médias de 63 e 24% utilizando placas com 20 mm de diâmetro (0,75 pol.) num padrão de grade de 10,2 cm (4 pol.) e 2,2 cm (0,85

pol.) de diâmetro num espaçamento de 6,4 cm (2,5 pol.), respectivamente. As compacidades relativas das amostras foram repetidas dentro de uma margem de 3%.

O dispositivo difusor é constituído por duas grandes peneiras espaçadas por 20 cm com os seus eixos em 45° entre si. O difusor pode ser movido durante o processo da chuva de areia para que se possa manter uma altura de queda constante acima da superfície da areia dentro da câmara. Uma distância mínima de 40 cm foi proporcionada entre o difusor e a placa de fundo “Rainer” de modo a que a velocidade final é conseguida para as partículas da areia que caem. O mecanismo difusor transforma os jatos de areia em uma areia de “chuva” uniforme. O objetivo do difusor é maximizar a dispersão das partículas e sua posição tem que ser alterada ao longo da chuva de areia, de forma que a distância entre o difusor e a areia depositada na câmara de calibração seja sempre de 20 a 40 cm, que segundo Jacobsen (1976), nestas condições a densidade de um depósito de areia de 1 metro de altura irá variar menos que 1%. A Figura 4.13 mostra o modelo utilizado por Jacobsen (1976). Esta técnica será adotada porque, conforme mostrada na revisão bibliográfica, é uma técnica muito difundida e bem aceita no meio geotécnico para realização de ensaios com o controle da compactação relativa em câmaras de calibração.

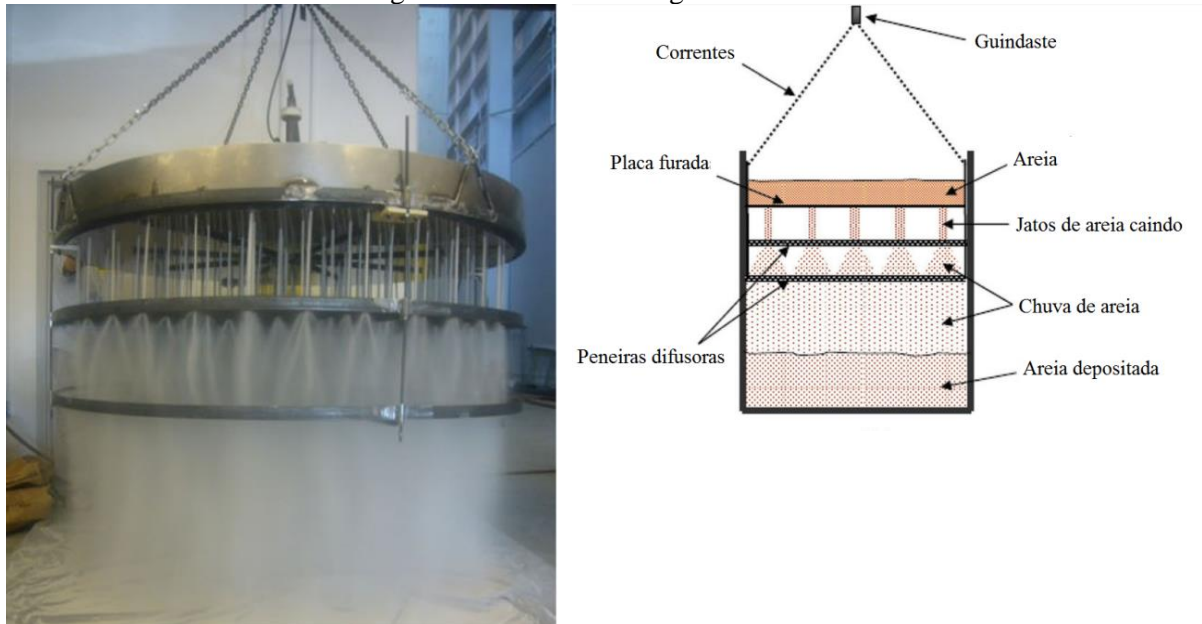


Fonte: Jacobsen (1976).

Choi *et al.* (2017) construíram um chuveiro em grande escala baseado no trabalho de Jacobsen (1976) conforme mostra a Figura 4.14. É um “espalhador” de areia em massa que

consiste em um recipiente de areia de aço, uma placa de acrílico e duas camadas de peneiras difusoras.

Figura 4.14: Chuveiro em grande escala



Fonte: Choi *et al.* (2017).

#### 4.3.3.2 Dimensionamento do Chuveiro

Conforme explicado no item anterior, o chuveiro é composto por três componentes: recipiente de armazenagem de areia, uma placa de fundo e um dispositivo difusor. O recipiente de armazenagem de areia é capaz de armazenar aproximadamente um volume de 0,40 m<sup>3</sup> de areia. Para definição da placa de fundo e o difusor foram realizados ensaios com amostras de areia no laboratório usando o dispositivo em escala reduzida mostrado na Figura 4.15. Este equipamento foi inspirado no trabalho de Miura e Toki (1982) e na dissertação de Oliveira Filho (1987). Ele consiste em um funil intercambiável com determinada abertura no bocal (simulando o diâmetro dos furos na placa de fundo) e duas peneiras que são utilizadas nos ensaios de granulometria e uma estrutura de fixação e sustentação vertical.

Figura 4.15: Foto do sistema de chuva de areia no ar



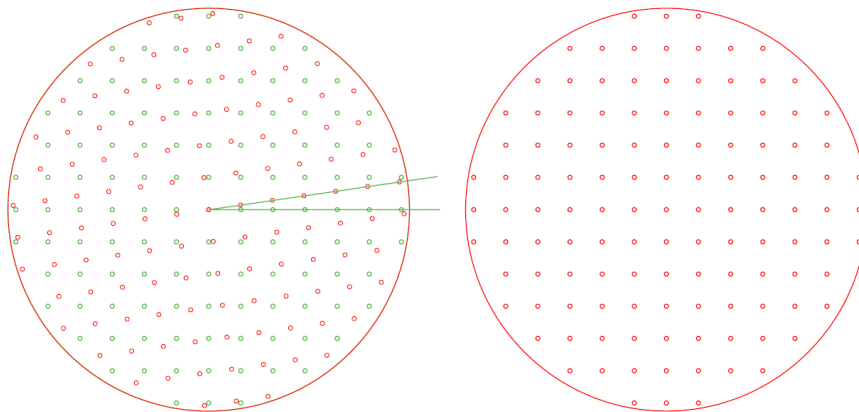
Fonte: Autor.

Os funis do chuveiro foram feitos com peças de acrílico, que cobriam uma ampla faixa de aberturas (desde 5 a 60 mm), com variação de bocais em torno de 5 mm. O conjunto de peneiras, por sua vez, apresenta duas aberturas de malhas, a superior com uma malha mais fina (menor) e a inferior com uma malha mais grossa (maior). As peneiras escolhidas foram determinadas segundo o estudo de Miura e Toki (1982) e tem suas malhas determinadas em função das características granulométricas das areias. Assim como no trabalho de Oliveira Filho (1987), procurou-se utilizar as peneiras disponíveis, aproximar-se das relações de diâmetro médio da areia/abertura da malha das peneiras usadas por Miura e Toki (1982). O diâmetro médio ( $D_m$ ) da areia de Toyura é de 0.18 mm, o mesmo diâmetro da areia de Analândia-SP, utilizada nos ensaios na câmara de calibração (descrito mais à frente). Por isto, o diâmetro das peneiras foi o mesmo utilizado por Miura e Toki (1982), sendo a peneira superior com diâmetro de 1.41 mm ( $D_{ps}$ ) e o diâmetro da peneira inferior foi de 3.66mm ( $D_{pi}$ ). Como já dito anteriormente, a realização desses ensaios pelo método da chuva de areia no ar através do

chuveiro apresenta a vantagem de menor influência do operador e maior repetibilidade dos resultados, inclusive na moldagem dos corpos de prova.

Os testes qualitativos foram realizados para os diversos diâmetros de funil, sequência de peneiras e alturas de queda. Os resultados dos ensaios encontram-se no APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório. A partir dos resultados obtidos, as placas de fundo “Rainer” utilizados na pesquisa foram 2 chapas de aço circulares com uma série de furos de 10 mm, usinados com distância de 80mm entre os furos, que caem dentro do limite do diâmetro de 1 metro da amostra de solo. A Figura 4.16 mostra a disposição dos furos, na imagem a esquerda é quando a posição da manivela de abertura está fechada, na imagem direita é quando a manivela está na posição aberta.

Figura 4.16: Disposição dos furos da chapa



Fonte: Autor.

O dispositivo difusor é constituído por duas grandes peneiras espaçadas umas das outras por 20 cm com os seus eixos em  $45^\circ$  entre si. As peneiras utilizadas foram: (1) a peneira superior com a malha #12 (1,65 mm) da ABNT e a malha inferior com a malha #4 (4,76 mm) da ABNT.

#### 4.3.3.3 Construção do “chuveiro” e seu funcionamento

O “chuveiro” foi fabricado pela empresa Pepthus Usinagem, conforme mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17: Chuveiro para deposição da areia na câmara de calibração



Fonte: Autor.

A placa de aço inferior do recipiente de areia e a placa de aço têm o mesmo padrão com furos circulares (diâmetro = 10 mm). Alinhando-se os orifícios na placa de acrílico e no recipiente de areia de aço perfurado, o recipiente de areia está aberto ou fechado. Além disso, existem duas camadas de peneiras difusoras com diferentes tamanhos de abertura montadas abaixo da placa de aço perfurada. A areia é descarregada do fundo do recipiente de areia, alinhando os orifícios da placa, e depois é uniformemente depositada na câmara de solo através destas duas peneiras difusoras. Os jatos de areia que caem são difundidos da peneira do primeiro difusor como funis, e depois “chovidos” da segunda peneira do difusor. Essas peneiras difusoras garantem que a areia seja uniforme e uniformemente distribuída dentro da câmara do solo. As amostras de areia podem ser preparadas com uma ampla faixa de densidades ajustando apenas a taxa de descarga de areia e a altura de queda.

Com isto, pode-se controlar a taxa de descarga de areia com a seleção do tamanho desejado da abertura da peneira, enquanto a altura de queda pode ser alterada ajustando-se a elevação do chuveiro usando uma talha manual. O chuveiro é preso a um pórtico (2,5m de altura) com uma talha manual para ser posicionado sobre o tanque de solo. O pórtico com rodízios acoplados pode ser movido livremente para que o chuveiro possa ser colocado acima do tanque de solo durante a precipitação de areia e longe dele durante a prova de carga. O

funcionamento do chuveiro é mostrado em detalhes no APÊNDICE D – Procedimento para montagem do “chuveiro”, execução da chuva de areia e fechamento da tampa.

#### 4.3.4 Sistema de instalação da estaca e a estrutura de reação

A estrutura de reação e o sistema de instalação também foram construídos pela empresa Peptus Usinagem, conforme mostram as Figura 4.18 e Figura 4.19, respectivamente. A estrutura de reação e o sistema de instalação da estaca são estruturas independentes. Após o preparo da amostra de solo com o auxílio do “chuveiro”, a instalação da estaca helicoidal no solo foi realizada com o auxílio do sistema de instalação. Depois de instalada era montada a estrutura de reação. Mais detalhes do ensaio serão abordados no capítulo 5.

A estrutura de reação tem formato de um cavalete, conforme mostra a Figura 4.18. No topo do cavalete existem duas chapas metálicas paralelas, distantes de 100 mm, que foram usados como reação para o macaco hidráulico vazado que fará ensaios de tração e de compressão.

Conforme mostra a Figura 4.19, o sistema de instalação é feito de 2 partes. Por conta da altura dentro do contêiner ser um limitante, primeiro parafusa-se o pé da estrutura Figura 4.19(a), em seguida posiciona-se a parte do motor (Figura 4.19(b)) que irá aplicar o torque de instalação na estaca.

Como pode ser visto na Figura 4.19(b) e (c), o sistema de instalação tem um motor elétrico acoplado numa chapa de aço e que “desliza” sobre duas barras de aço presas na base do sistema de instalação. A corrente é presa no motor e em uma barra rosqueada (presa por uma luva na estaca). Quando o motor é ligado, o movimento da corrente faz com que a barra gire, exercendo um torque na estaca. Para a instalação da estaca, foi usada uma rosca com passo de 40 mm (mesmo passo das estacas ensaiadas), para garantir o avanço da estaca modelo no solo igual a um passo de hélice por volta. A parte superior da haste da estaca (externa) passava pela rosca para garantir esta condição.

A base do sistema de instalação tem forma de cavalete, para suportar o torque na base da estrutura. Esta estrutura era aparafusada na tampa da câmara de calibração, que funciona como reação para que a estrutura não girasse junto com a rosca. Além disto, é garantido que somente a estaca gire e a câmara fica-se parada, não precisando ser fixada na base.



Figura 4.18: Fotos da estrutura de Reação



Fonte: Autor.

Figura 4.19: Fotos do sistema de Instalação: (a) Base da estrutura e (b) motor e o moto redutor que aplica o torque na estaca (c) estrutura montada



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

#### 4.3.5. Sistema para aquisição de dados

Durante os ensaios, para a aquisição de dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados da HBM, onde foram registradas as leituras dos “*strain gauges*” de torque e de força axial instalados na estaca, dos sensores de pressão colocados no solo durante a chuva de areia, e da célula de carga nos ensaios de carregamento nas estacas.

#### 4.3.6. Acessórios diversos

##### 4.3.6.1. Considerações iniciais

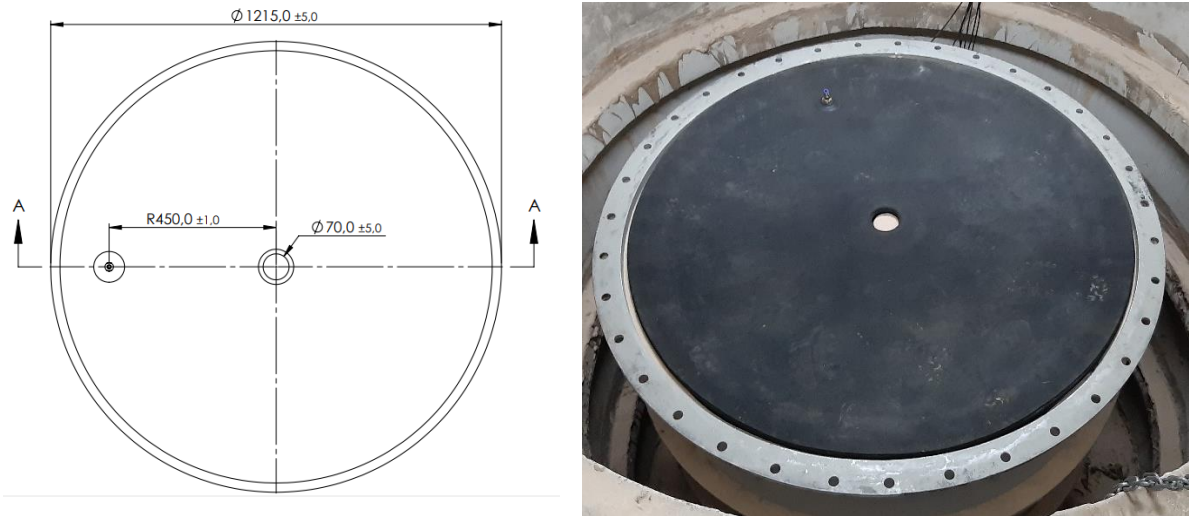
Para os ensaios realizados na câmara de calibração desta pesquisa a aplicação de pressão no topo da amostra foi feita por ar comprimido. A câmara de calibração permite que seja aplicada uma tensão de sobrecarga vertical na amostra por meio de uma bolsa de reação, independente da compactidade relativa da areia.

##### 4.3.6.2. Bolsa de reação

A bolsa de reação utilizada sobre a amostra de areia tinha que ser resistente o suficiente para não rasgar durante o ensaio, e ao mesmo tempo flexível o bastante para que pudesse aplicar uma pressão uniforme no topo da amostra de areia. Nesta bolsa de reação é aplicado ar comprimido, através de um compressor de ar comprimido que será descrito a seguir. O objetivo desta bolsa de reação é aplicar as tensões verticais de sobrecarga, de forma a confinar o solo, como ocorrem na profundidade de campo a ser simulada.

A bolsa de reação é uma bolsa de borracha níttrica com espessura de 3mm (dureza 70 Sh A) pressurizada que foi utilizada para a aplicação de pressões confinantes no solo. Esta bolsa foi feita manualmente pela empresa Conbor com 1,215 metros de diâmetro e sua espessura total 20 mm. Esta bolsa de reação tem formato circular com um furo central de 65mm para possibilitar o movimento da haste central da estaca no centro da câmara de calibração durante a instalação e nos ensaios de carregamento. A Figura 4.20 mostra a bolsa de reação utilizada nos ensaios desta pesquisa.

Figura 4.20: Desenho e foto da bolsa de reação



Fonte: Autor.

#### 4.3.6.3 Sistema de aplicação de ar comprimido e acessórios

Para aplicação de ar comprimido na bolsa de reação, foi necessário um compressor de ar comprimido que gerasse uma pressão de 150 kPa, valor definido para operação dentro da câmara de calibração nesta pesquisa. Para isto foi comprado um compressor da marca PRESSURE de Ar Monofásico 10 Pés 100 Litros 110/220v, modelo Atg2, conforme Figura 4.21.

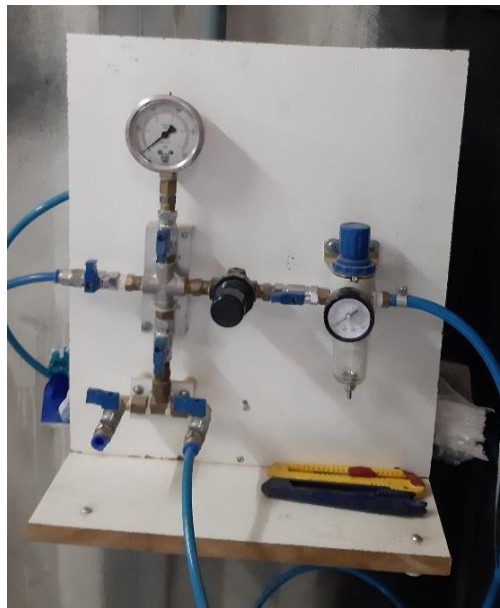
Figura 4.21: Compressor Pressure



Fonte: Autor.

Como a pressão mínima que este compressor gera é muito alta, foi feito um painel de controle de pressão para que fosse possível controlar a pressão de entrada na bolsa de reação de 50, 100 e 150 kPa. Uma linha de ar comprimido saindo do compressor até o painel de controle central fornecia a pressão vertical imposta pela bolsa de reação na amostra de areia. O painel de controle é composto por: (1) um manômetro construído em caixa de aço carbono, com mostrador com diâmetro de 63mm com glicerina interno fabricada pela empresa Salvi Casagrande; (2) um mini regulador de pressão de ¼”, modelo R07-200RNKA da marca Norgren que trabalha na faixa de 30 a 700 kPa, e (3) conjunto de cruzeta, niples e válvulas de esfera para abrir e fechar a entrada de ar comprimido. A Figura 4.22 mostra o painel feito para controlar a pressão na bolsa de reação. Além disto, na saída do compressor, foi instalado um regulador de ar comprimido com filtro de ar para eliminar entrada de água ou excesso de umidade na linha mantendo a pressão e vazão constante durante o ensaio.

Figura 4.22: Painel para controle da pressão de ar comprimido



Fonte: Autor.

#### 4.3.6.4 *Big Bags* para Armazenamento da Areia

Os big bags para armazenamento da areia também são importantes, pois a areia a ser utilizada para o ensaio tinha que estar à disposição o mais próximo possível da câmara de calibração. Ao final de cada ensaio, utilizava-se uma “concha para cereais” para retirar

manualmente a areia de dentro da câmara de calibração, a fim de não danificar os mini sensores de tensão e colocava-se a areia dentro dos Bags novamente.

Além disto, a areia tem que estar seca, pois, se estivesse molhada, ela entupia o “chuveiro”. A areia foi completamente seca ao sol, e ficava próximo da câmara de calibração, conforme mostra a Figura 4.23. Ao todo foram comprados 5 m<sup>3</sup> de areia. Dentro do container onde a câmara foi instalada estoca-se 3 m<sup>3</sup> de areia seca.

Figura 4.23: Fotos dos big bags com areia



Fonte: Autor.

## 4.4 AREIA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

### 4.4.1 Descrição das partículas: Mineralogia e formato dos grãos

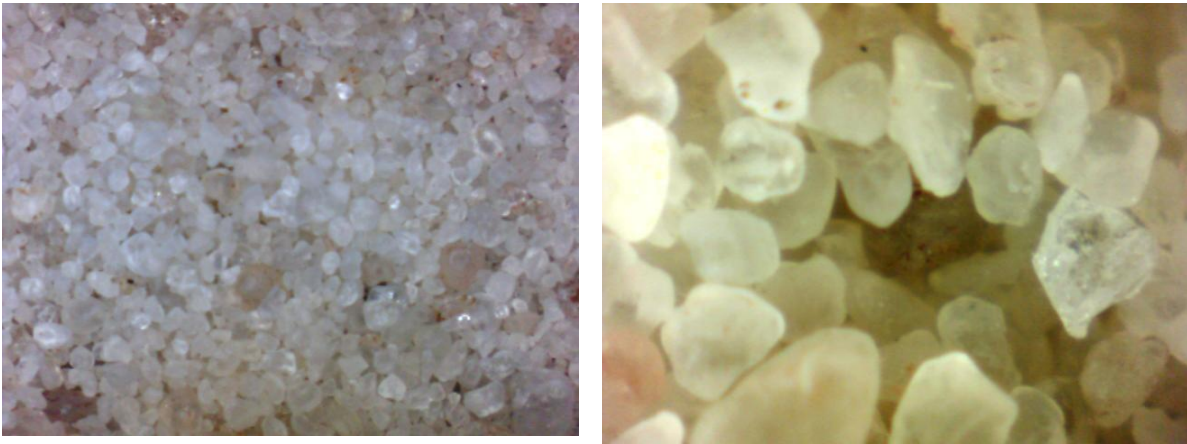
O solo utilizado nesta pesquisa corresponde a uma areia fina, retirada de uma cava em Analândia (SP). A empresa que fez a coleta e a comercialização da areia chama-se CRS Mineração. Segundo a empresa, a areia é retirada por desmonte hidráulico em cavas secas e para separar a areia lavada (fina) usa-se peneiras visando remover os grãos grossos e de outras impurezas indesejáveis.

As areias podem apresentar padrões de formatos de grãos diferentes, que por sua vez influenciará o comportamento mecânico do solo quando tais grãos estiverem combinados.

A identificação mineralógica foi feita através de identificação visual com o auxílio de microscópio com sistema de ampliação e captura de imagem digital. Foram observadas as amostras representativas da areia em sua totalidade de diâmetros expondo o aspecto geral. De maneira geral, o conjunto de partículas que compõe a areia estudada, a forma predominante dos grãos varia de angular a sub-angular.

Além da forma dos grãos, também tem influência no comportamento mecânico a mineralogia das partículas de areia, contribuindo fundamentalmente na resistência individual à quebra dos grãos. Os grãos de areia da cava de Analândia são na sua totalidade de quartzo. A Figura 4.24 apresenta a amostra da areia com seus grãos de quartzo predominantemente angular a sub-angular.

Figura 4.24: Partículas da areia com grãos de diâmetros heterogêneos



Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Propriedades

##### 4.4.2.1 Densidade real dos grãos ( $G_s$ )

A densidade real dos grãos é a relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume. Esta característica varia pouco de solo para solo sendo insuficiente por si só para a caracterização de um determinado solo. Porém, o valor é importante para a determinação de outros índices.

Para o cálculo desta razão, foram pesados 60,04gf da amostra de areia ( $W_s$ ), medida diretamente por uma balança digital com sensibilidade de 0,01 gf. A partir disto seguiu-se os seguintes passos:

- (1) Colocou-se a amostra de areia dentro do picnômetro com o auxílio de um funil de vidro e em seguida enchendo até a metade do picnômetro de água destilada;
- (2) Aplicou-se um vácuo de 88 kPa no picnômetro por 15 min, e percebeu-se que já havia saído todo o ar de dentro do picnômetro;

- (3) Completou-se o picnômetro com água deaerada até a marca de referência, em seguida, colocou-se na geladeira até que fosse atingido 15°C de temperatura;
- (4) Após retirar da geladeira, mediu-se a temperatura em 3 níveis do picnômetro. A primeira leitura estava com 18 °C, ou seja, dentro intervalo de temperatura (15 a 25 °C) determinado pela ABNT. Acertou-se o menisco (tangente à marca de referência) e secou-se o gargalo interno e a parede externa do picnômetro para a pesagem do picnômetro. Com isto, determinou-se a massa do conjunto, que é o peso da amostra de solo seco + o picnômetro totalmente preenchido com água deaerada + o próprio picnômetro. Este processo foi repetido por mais 4 vezes, nas temperaturas de 20, 22, 23 e 25 °C.

O peso do picnômetro com água deaerada somada com o peso do solo seco e subtraída do peso do picnômetro com a amostra de solo completado com água corresponde ao peso da água ( $W_w$ ), que ocuparia o espaço ocupado pelas partículas de solo. Com isto, conhecendo-se o peso específico da água na temperatura ensaiada foi possível efetuar o cálculo do volume de solo utilizado.

O volume de solo utilizado é igual ao volume de água deslocado calculado pela razão entre o peso da água deslocada ( $W_{w'}$ ) e sua densidade na temperatura do sistema, conforme mostra a equação .

$$V_S = V_{w'} \quad V_{w'} = \frac{\gamma_w}{W_{w'}} \quad 4.1$$

Onde:  $V_S$  = Volume do solo;

$V_{w'}$  = Volume da água deslocada;

$\gamma_T$  = Peso específico da água.

O ensaio de massa específica dos grãos, realizado conforme NBR 6508/84, forneceu o valor de densidade real dos grãos ( $G_s$ ) de 2,669, média de cinco experimentos de pequena dispersão.



#### 4.4.2.2 Granulometria

Como o solo utilizado é areia fina, ou seja, tratava-se de grãos de areia sem presença de silte ou argila, foi feita a granulometria somente por peneiramento. A curva granulométrica obtida constatou a condição da areia mal graduada com coeficiente uniformidade (CU) igual a 1,72. Segundo Souza Pinto (2006), quanto maior o coeficiente de uniformidade, mais bem graduada é a areia. Areias com coeficiente menor que 2 como é o caso desta areia, são areias uniformes. O coeficiente de não uniformidade é a razão entre o diâmetro inferido no qual se situam 60% em peso do material ( $D_{60}$ ) e o diâmetro no que se situam 10% em peso do material da amostra ( $D_{10}$ ), conforme apresentado na equação 4.2:

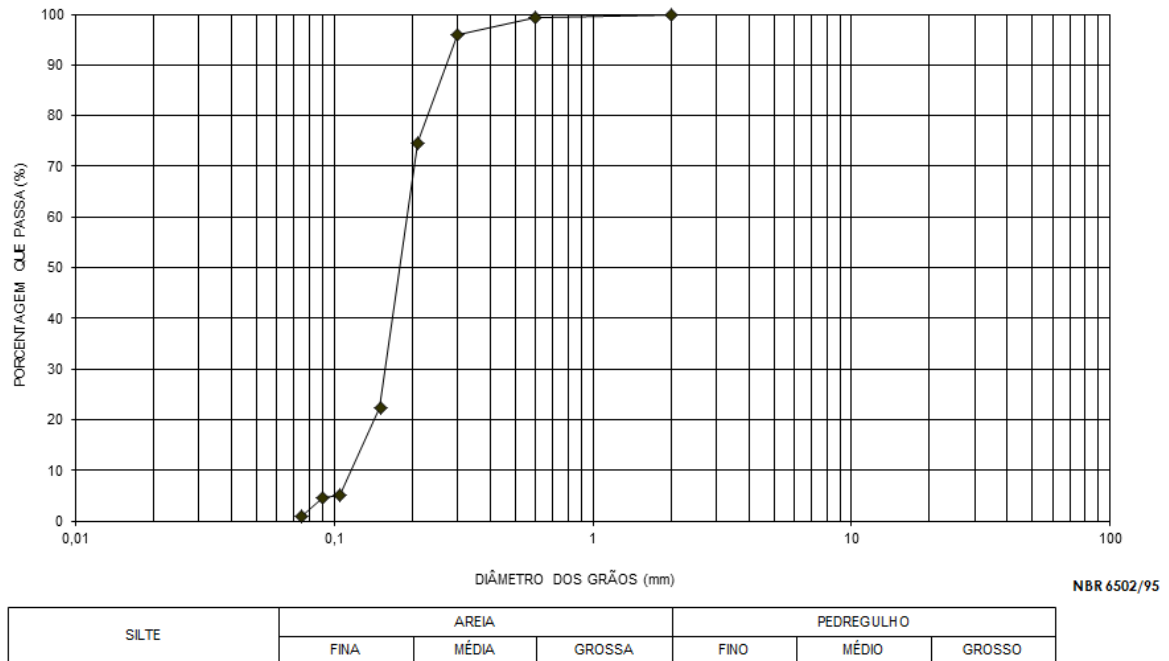
$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 4.2$$

Para amostra em questão:  $D_{60} = 0,19$  mm,  $D_{10} = 0,11$  mm e  $CU = 1,72$ mm. O coeficiente de curvatura é igual a 1,22, ou seja, encontra-se dentro do intervalo padrão de comportamento sem descontinuidades observadas em areias (intervalo entre 1 e 3). O coeficiente de curvatura é definido pela equação 4.3:

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad 4.3$$

Para a amostra em questão:  $D_{30} = 0,16$  mm,  $D_{60} = 0,19$  mm,  $D_{10} = 0,11$  mm e  $CC = 1,22$ mm. A curva granulométrica da areia confirma o comportamento esperado pelos valores encontrados de coeficiente uniformidade (CN) e o coeficiente de curvatura (CC). A curva é apresentada na Figura 4.25, a seguir.

Figura 4.25: Curva granulométrica da areia ensaiada



Fonte: Autor.

O  $D_{50}$  da areia utilizada é de 0,18 mm.

#### 4.4.2.3 Índice de vazios máximo e mínimo

##### 4.4.2.3.1 Considerações iniciais

Para melhor caracterização a partir do índice de vazios natural ( $e_{nat}$ ) da amostra é necessária sua identificação dentro de uma faixa bem definida, sendo delimitados pelos índices de vazios máximo ( $e_{max}$ ) e mínimo ( $e_{min}$ ), que se correlacionam respectivamente ao estado mais fofo e o mais compacto do solo. Os índices de vazio máximo e mínimo são propriedades do solo e o índice de vazios natural da amostra correlaciona-se através da compacidade relativa (CR). A avaliação do índice de vazios máximo e mínimo foi necessária durante todo o processo de construção da câmara de calibração, tanta para estabelecer qual seria a compacidade relativa da moldagem do corpo de prova nos ensaios a serem realizados na câmara de calibração como para auxiliar no projeto do “Chuveiro” para realizar a chuva de areia.

Vale ressaltar aqui que o índice de vazios mínimos (situação mais compacta) foi “alterando-se” conforme mudava o tipo de ensaio para caracteriza-lo. No início do projeto, quando só era disponível a areia para o estudo, foi feito o ensaio de densidade máxima e mínima para caracteriza-la segundo a NBR12051/91 e a NBR 12004/90. Algum tempos depois, quando

foram feitos os ensaios da chuva de areia em laboratório, encontrou-se um índice de vazios mínimo menor que o determinado pelo procedimento da norma. Tais ensaios foram feitos para determinar as dimensões do “chuveiro” usado nos ensaios da câmara de calibração. Por fim, durante a calibração do “chuveiro” na câmara de calibração, para descobrir a compacidade relativa dentro da câmara de calibração, descobriu-se que o índice de vazios mínimo, era menor do que determinado pela norma e pelo ensaio de chuva de areia no laboratório. Ou seja, conforme a pesquisa avançava usando novas técnicas de preparo de amostra, conseguia-se compactar mais a amostra. Isso era previsto já que pesquisas anteriores relataram o mesmo problema. Por conta disto, será detalhado a seguir, cada um dos ensaios para determinação dos índices de vazios.

#### 4.4.2.3.2 Índice de vazios mínimo segundo a ABNT

Para determinação do estado mais compacto, seguiu-se as modificações propostas por Souza Pinto (2006) na NBR 12051/91. O autor sugere que deve ser preparado vibrando-se a areia no molde com uma sobrecarga sobre a mesma e calcular o respectivo índice de vazios mínimo ( $e_{min}$ ). A seguir será explicado o procedimento:

- (1) Pesou-se um cilindro metálico pequeno (Proctor). Obtiveram-se as medidas do diâmetro e da altura deste cilindro para o cálculo do volume (Tabela 4.6);
- (2) Colocou-se uma quantidade aleatória de areia no cilindro metálico, tomando cuidado de vibrar manualmente o material à medida que este é despejado;
- (3) Após preencher todo o cilindro, incluindo o colar, colocou-se sobre a areia uma sobrecarga equivalente a 13,2 kPa, e colocou-se todo o conjunto sobre o vibrador de peneiras, o qual foi acionado por um período de 15 minutos e com frequência de 9 Hz (Figura 4.26);
- (4) Ao acabar o tempo, retirou-se o colar do cilindro e limpou-se o excesso de areia na região do colar com cuidado (Figura 4.26);
- (5) Pesou-se o cilindro com a areia e, por subtração, obteve-se a massa de areia dentro do cilindro. A densidade máxima é a razão entre esta massa e o volume do cilindro;
- (6) Foi realizado este procedimento 4 vezes. O resultado final é a média dessas determinações.

Tabela 4.6: Características do cilindro utilizado

Peso do cilindro	5642 gf
Diâmetro do cilindro	9,995 cm
Altura do cilindro	12,75 cm
Volume do cilindro	1000 cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor.

O ensaio de densidade máxima aparentemente seca determinada pela média dos resultados foi de 1,66 g/cm<sup>3</sup>, conforme Tabela 4.7. Para o índice de vazios mínimo, encontrou-se  $e_{\min} = 0,608$ .

Figura 4.26: Processo de moldagem por vibração



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios para determinar o  $e_{min}$ 

Corpos de Prova	Massa Total (g)	Massa da areia (g)	Densidade Máxima $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )*
1	7304	1662	1,66	16,30
2	7300	1658	1,66	16,26
3	7296	1654	1,65	16,23
4	7294	1652	1,65	16,21
*g = 9,81 m/s <sup>2</sup>		Média =	1,66	16,25

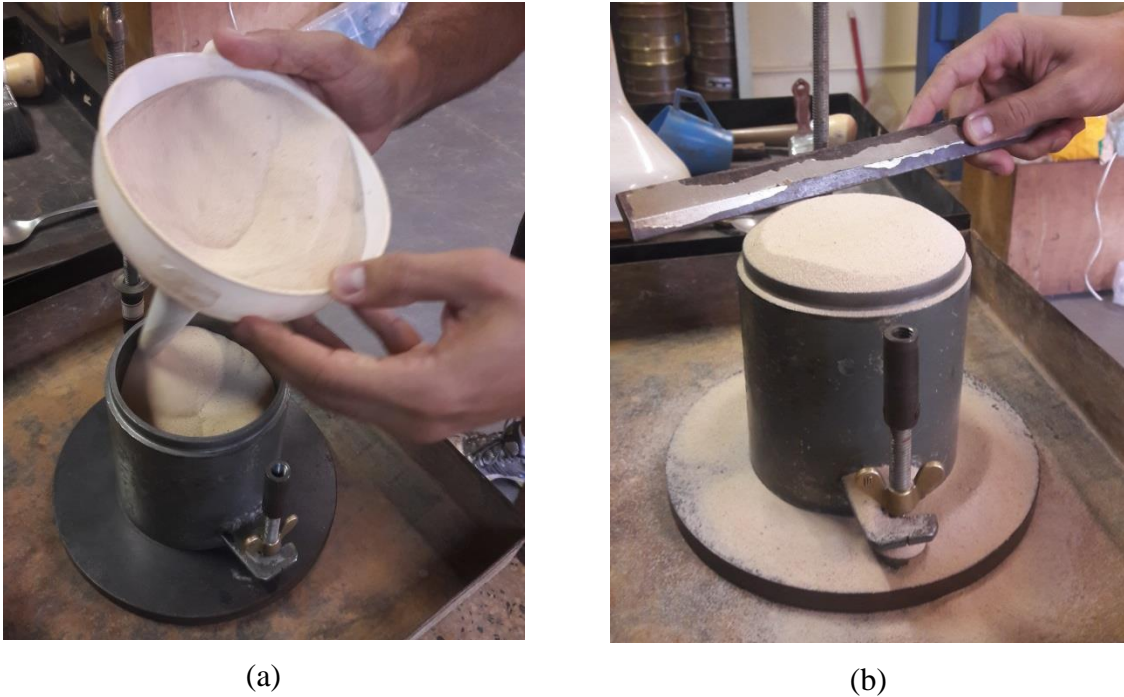
Fonte: Autor.

#### 4.4.2.3.3 Índice de vazios máximo segundo a ABNT

Para obtenção da densidade mínima (índice de vazios máximo) utilizou-se algumas modificações em relação à NBR 12004/90, conforme descrito a seguir:

- (1) Pesou-se um cilindro metálico pequeno (Proctor). Obtiveram-se as medidas do diâmetro e da altura deste cilindro para o cálculo do volume (Tabela 4.6);
- (2) Colocou-se a areia dentro do cilindro metálico com o auxílio de um funil de bico longo. Este funil tem a função de direcionar o fluxo de areia no interior do cilindro para que não sofra nenhum processo de densificação. A Figura 4.27 ilustra este procedimento.
- (3) Após preencher todo o cilindro, tira o excesso com uma régua metálica e limpa-se o excesso de material da região do colar com um pincel. Tomou-se o máximo de precaução, pois qualquer vibração podia levar a uma pequena alteração na densidade da areia, invalidando o ensaio;
- (4) Pesou-se o cilindro com a areia e, por subtração, obteve-se a massa de areia dentro do cilindro. A densidade mínima é a razão entre esta massa e o volume do cilindro;
- (5) Foi realizado este procedimento 4 vezes. O resultado final é a média dessas determinações.

Figura 4.27: Determinação da densidade mínima



(a)

(b)

Fonte: Autor.

O ensaio de densidade mínima aparentemente seca determinada pela média dos resultados foi de  $1,46 \text{ g/cm}^3$ , conforme a Tabela 4.8. Para calcular o índice de vazios máximo, Divide-se a densidade real dos grãos pela densidade mínima, o resultado desta divisão diminui por 1. Deste modo, o  $e_{\text{max}} = 0,828$ .

Cabe ressaltar aqui que, os valores do ensaio da densidade mínima, diferente do dos ensaios de densidade máxima, podem variar muito devido às vibrações a que o corpo de prova estiver sujeito.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de densidade mínima.

Corpos de Prova	Massa Total (g)	Massa da areia (g)	Densidade Mínima $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Peso específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )*
1	7102	1460	1,46	14,32
2	7104	1462	1,46	14,32
3	7108	1466	1,47	14,42
4	7106	1464	1,46	14,32
*g = 9,81 m/s <sup>2</sup>		Média =	1,46	14,35

Fonte: Autor.

#### 4.4.2.3.4 Índice de vazios segundo o método da chuva de areia em laboratório

Conforme explicado no item 4.4.2.3.1 - Considerações iniciais, durante os ensaios da chuva de areia, o índice de vazios mínimo foi menor do que o valor obtido no ensaio pela norma brasileira, ou seja, foi encontrado a areia em estado mais compacto. Este ensaio foi baseado no trabalho de Miura & Toki (1982). Para realização do ensaio em laboratório foi necessário um funil, uma peça de náilon com diâmetros variando de 5 a 60 mm, 4 barras rosqueadas de ¼” com porcas, 2 peneiras que são utilizadas nos ensaios de granulometria e 2 placas de madeira para usar como estrutura de fixação das peneiras e o funil, conforme mostra a Figura 4.28.

Foram utilizadas peneiras disponíveis no laboratório de Geotecnia da EESC, aproximando-se das relações de diâmetro médio da areia/abertura da malha das peneiras usadas por Miura e Toki (1982). O diâmetro médio da areia de Toyura é de 0.18 mm ( $D_m$ ), o mesmo diâmetro da areia de Analândia-SP (utilizada nos ensaios). Por isto, o diâmetro das peneiras foi o mesmo utilizado por Miura e Toki (1982), sendo a peneira superior com diâmetro de 1.41 mm ( $D_{ps}$ ) e o diâmetro da peneira inferior foi de 3.66mm ( $D_{pi}$ ). Como já dito anteriormente, a realização desses ensaios pelo método da chuva de areia no ar através do chuveiro apresenta a vantagem de menor influência do operador e maior repetibilidade dos resultados, inclusive na moldagem dos corpos de prova.

Figura 4.28: Foto do sistema de chuva de areia no ar com as alturas de queda e diâmetros pré-definidos



Fonte: Autor.

Os testes qualitativos foram realizados para os diversos diâmetros de funil, sequência de peneiras e alturas de queda. Os resultados dos ensaios encontram-se no APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório.

A seguir descreve-se o procedimento deste ensaio:

- (1) Pesou-se um cilindro metálico pequeno (Proctor). Obtiveram-se as medidas do diâmetro e da altura deste cilindro para o cálculo do volume (Tabela 4.9);
- (2) Ajustava-se altura de queda da areia em relação ao bico do funil até a primeira peneira (difusor), depois ajustava-se a altura da segunda peneira (difusor) até o topo do cilindro metálico. Além disso, colocava-se a peça de náilon no bico do funil com um diâmetro pré-definido.
- (3) Colocou-se a areia dentro do funil com o bico de diâmetro previamente definido. Este funil tem a função de direcionar o fluxo de areia no interior da peneira do difusor.



- (4) Após preencher todo o cilindro de Proctor, tira o excesso com uma régua metálica e limpa-se o excesso de material da região do colar com um pincel. Tomou-se o máximo de precaução, pois qualquer vibração podia levar a uma pequena alteração na densidade da areia, invalidando o ensaio;
- (5) Pesou-se o cilindro com a areia e, por subtração, obteve-se a massa de areia dentro do cilindro. A densidade da areia é a razão entre esta massa e o volume do cilindro;

Foi realizado este procedimento 10 vezes para cada ensaio com diâmetro de funil e alturas de quedas pré-definidas. O resultado final dessas determinações encontra-se no APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório.

Tabela 4.9: Informações sobre o cilindro.

Características	Dimensões
Peso do cilindro [g]	3574
Diâmetro do cilindro [cm]	10,14
Altura do cilindro [cm]	12,70
Volume do cilindro [cm <sup>3</sup> ]	1025,58

Fonte: Autor.

Dessa forma, foi possível fazer os ensaios variando as alturas e a abertura do bocal do funil, conforme dados do APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório. O índice de vazios máximo e mínimo encontrado nos ensaios foi de 0,823 e 0,539, respectivamente.

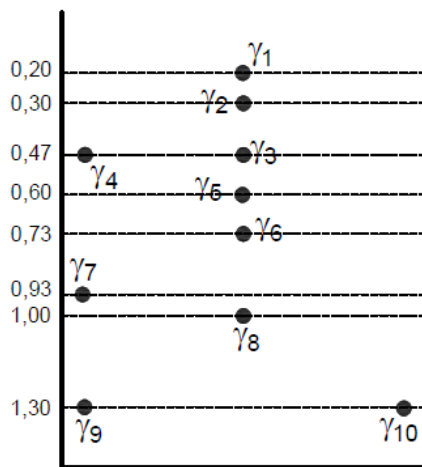
#### 4.4.2.3.5. Índices de vazios encontrados na câmara de calibração

Para verificar a compacidade da areia na câmara de calibração, foram feitos 3 ensaios simulando a chuva de areia dentro da câmara de calibração. Em cada ensaio, encheu-se a câmara de areia até o topo, com pequenas capsulas cilíndricas instaladas em seu interior. A seguir descreve-se o procedimento deste ensaio:

- (1) Pesou-se pequenas capsulas em forma de cilindro metálicos. As medidas do diâmetro e da altura destes cilindros foram determinadas para o cálculo do volume;
- (2) Ajustou-se altura da placa metálica furada até o difusor para 40 cm (este valor foi definido após análise dos ensaios de chuva de areia no laboratório).

- (3) Colocou-se a areia dentro do reservatório com ajuda de uma “pá de cereais” e um balde de 10 litros até encher o reservatório.
- (4) Após preencher todo o reservatório, posicionava-se o chuveiro de modo que a altura de queda da areia entre o difusor e o topo da areia na câmara fosse 40 a 60 cm. Este procedimento do feito até que completasse de areia a câmara de calibração;
- (5) Após a remoção da areia da câmara de calibração, pesou-se as cápsulas com a areia e, por subtração, obteve-se a massa de areia dentro do cilindro. A densidade é a razão entre esta massa e o volume do cilindro;
- (6) Foi realizado este procedimento 3 vezes para cada ensaio com diâmetro de funil e alturas de quedas pré-definidas. O resultado final dessas determinações encontra-se nas figuras a seguir.

Figura 4.29: Resultados de peso específico da areia dentro da câmara de calibração após a primeira chuva de areia



Dimensões em metros  
sem escala

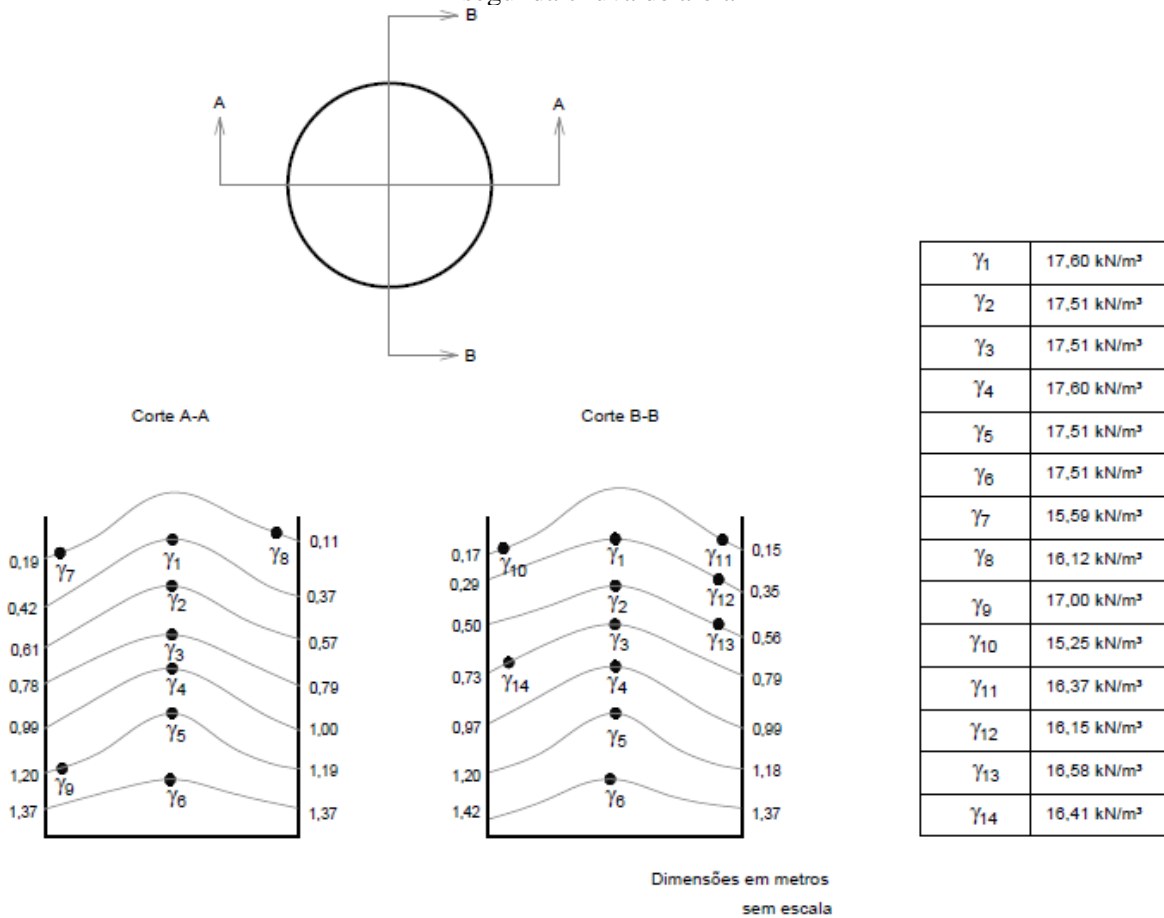
Fonte: Autor.

$\gamma_1$	17,51 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_2$	17,60 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_3$	17,51 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_4$	16,83 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_5$	17,51 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_6$	17,60 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_7$	16,83 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_8$	17,51 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_9$	16,67 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{10}$	16,58 kN/m <sup>3</sup>

Na primeira chuva de areia não foi feita a medição da configuração final da areia, por se tratar de uma primeira análise. Foram apenas medidas as profundidades e a distância em relação a parede da câmara de calibração do local das cápsulas para determinar a variação do peso específico da areia dentro da câmara de calibração. Conforme mostra a Figura 4.29, os pontos representam a localização das cápsulas dentro da câmara de calibração. Os números na lateral esquerda da câmara é a profundidade da capsula em relação ao topo da câmara de

calibração. Neste primeiro teste, colocou-se as cápsulas apenas no centro e nas laterais esquerda e direita da câmara de calibração. Nesta chuva de areia, conforme a areia ia caindo do reservatório, subíamos o chuveiro através da talha manual para que a altura entre o topo da areia a base do chuveiro fosse constante. Após análise do comportamento do chuveiro e a da areia dentro da câmara de calibração passamos para o segundo ensaio, com os resultados mostrados na Figura 4.30, a seguir.

Figura 4.30: Peso específico e a configuração final da areia dentro da câmara de calibração após a segunda chuva de areia

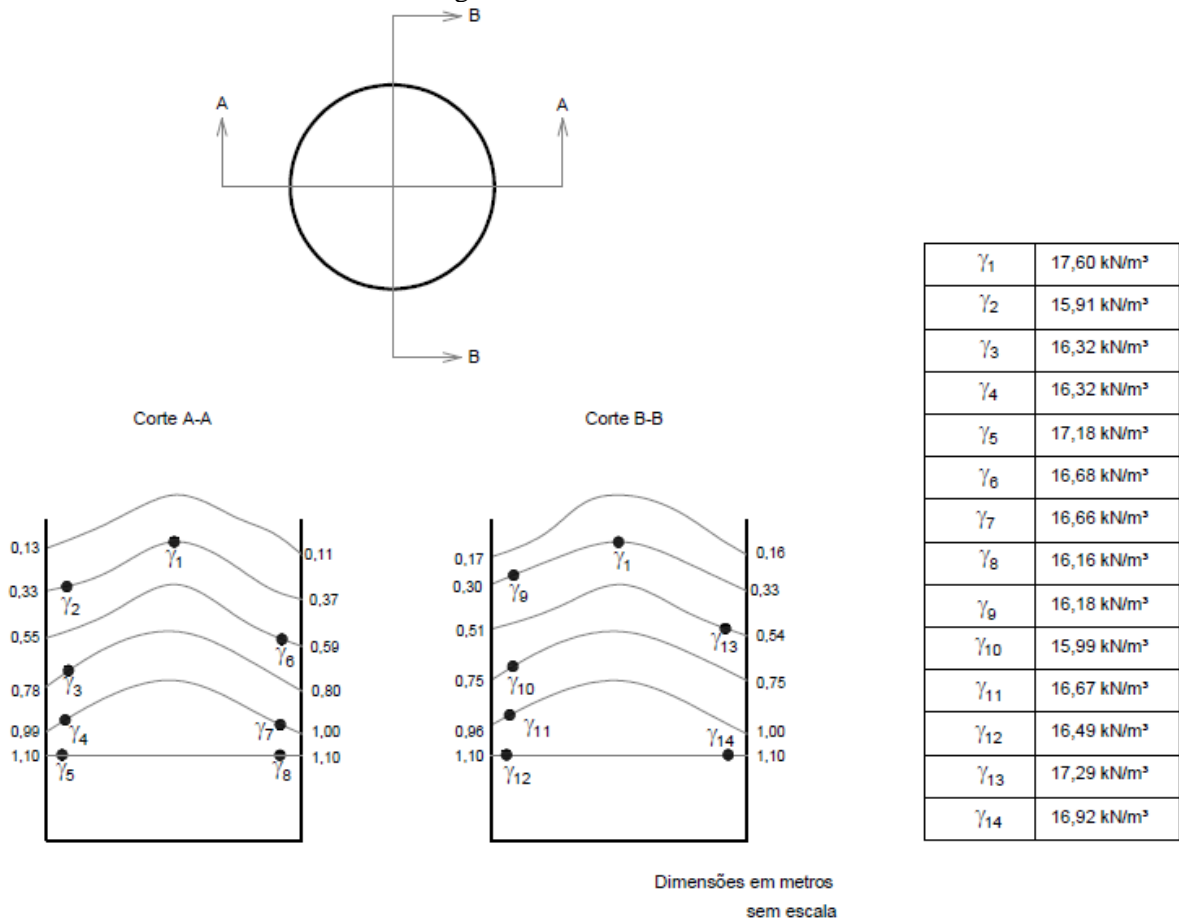


Fonte: Autor.

Na segunda chuva de areia foi feita a medição da configuração final da areia. Conforme mostra a Figura 4.30, a cada vez que é feita uma chuva de areia, vai formando um cone de areia dentro da câmara de calibração. Este processo também foi observado por Jacobsen (1976). Desta vez, sabia-se o peso específico da areia dentro da câmara, e queria-se comparar com o anterior e ver a variação da areia. Os números na lateral da câmara é a profundidade da cápsula em relação ao topo da câmara de calibração. Neste segundo teste, colocou-se as cápsulas no centro e nas laterais da câmara de calibração. Nesta chuva de areia, para comparar com o ensaio

anterior, não foi levantado o chuveiro através da talha manual para que a altura entre o topo da areia a base do chuveiro fosse constante. Verificou-se que no centro da camada de areia dentro da câmara de calibração, não altera em nada o peso específico da areia. Após análise do comportamento do chuveiro e a da areia dentro da câmara de calibração passou-se para o terceiro ensaio, com os resultados mostrados na Figura 4.31, a seguir.

Figura 4.31: Peso específico e a configuração final da areia dentro da câmara de calibração após a segunda chuva de areia no ar



Fonte: Autor.

Na terceira chuva de areia foi feita a medição da configuração final da areia e focou-se mais no peso específico das laterais. Desta vez, já conhecia-se o peso específico da areia dentro da câmara, queria-se comparar com o anterior e ver a variação da areia. Os números na lateral da câmara é a profundidade da cápsula em relação ao topo da câmara de calibração. Nesta chuva de areia, para comparar com o ensaio anterior, não subíamos o chuveiro através da talha manual para que a altura entre o topo da areia a base do chuveiro fosse constante. Verificou-se que no centro da camada de areia dentro da câmara de calibração, não altera em nada o peso específico

da areia. Como pode ser visto nas Figura 4.29 e Figura 4.30, no centro da areia (onde a estaca vai passar) a variação é muito pequena.

Já em relação as laterais, percebe-se que a variação é maior. Jacobsen (1976) descreve em seu artigo, que isso pode ser explicado pelo jato de ar que é gerado lateralmente em direção as paredes do tanque. Isto gera um fluxo de ar instável muda a densidade da areia mais a extremidade lateral.

Os valores de índice de vazios máximo e mínimo encontrados nos ensaios dentro da câmara de calibração foi de 0,717 e 0,488, respectivamente.

#### 4.4.3 Ensaios Triaxiais CID

Após a aquisição da areia que foi utilizada nos ensaios na câmara de calibração, foi realizado ensaios triaxiais para determinação dos parâmetros de resistência. Por ser um ensaio bem corriqueiro no meio geotécnico, não foi mostrado aqui o procedimento de como foi feito os ensaios. Para maiores detalhes do procedimento do ensaio ver APÊNDICE E – Procedimento para execução dos ensaios triaxiais.

#### 4.4.4 Resultados e análises da areia

Os resultados dos ensaios obtidos apresentados neste item permitem avaliar o comportamento do solo usado nos ensaios na câmara de calibração.

##### i. Ensaios da compactidade relativa:

Os resultados encontrados pelo autor estão apresentados resumidamente na Tabela 4.10

Tabela 4.10: Resumo dos Parâmetros

Densidade real dos grãos (Gs)	2,669	
Índice de vazios (e) ABNT	$e_{máx} = 0,828$	$e_{min} = 0,608$
Peso específico seco ( $\gamma$ ) ABNT	$\gamma_{min} = 14,35 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{máx} = 16,25 \text{ kN/m}^3$
Índice de vazios (e) CA LAB	$e_{máx} = 0,823$	$e_{min} = 0,539$
Peso específico seco ( $\gamma$ ) CA LAB	$\gamma_{min} = 14,36 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{máx} = 17,01 \text{ kN/m}^3$
Índice de vazios (e) CC	$e_{máx} = 0,717$	$e_{min} = 0,488$
Peso específico seco ( $\gamma$ ) CC	$\gamma_{min} = 15,25 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{máx} = 17,60 \text{ kN/m}^3$

Fonte: Autor.

Onde CA LAB significa chuva de areia em laboratório e CA CC significa chuva de areia na câmara de calibração.

Após o termino dos ensaios desta tese, o aluno de mestrado Matheus Morato Annicchini, que continuará a pesquisa, realizou ensaios de cisalhamento direto na amostra de areia com compactidade relativa de 100%, e encontrou um índice de vazios mínimo de 0,482 e o peso específico máximo de 17,66 kN/m<sup>3</sup>. Nesses ensaios, encontrou-se para esta compactidade relativa de 100% um ângulo de atrito de pico igual a 39.8°.

ii. Ensaio Triaxial:

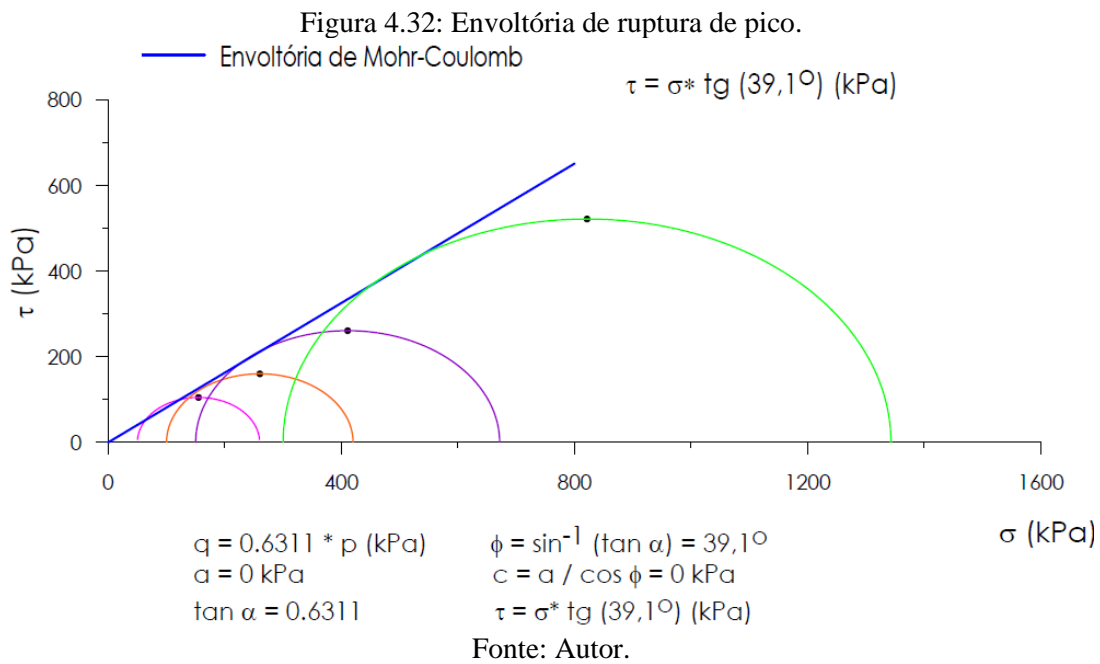
As Figura 4.34 e Figura 4.35 mostram o comportamento encontrado para a areia com compactidade relativa próxima a 65%. Todas as amostras foram preparadas com a mesma areia e mesmo índice de vazios. O ensaio triaxial foi feito na amostra com esta compactidade relativa, equivalente ao valor de  $e_{min}$  encontrado segundo a ABNT. Conforme foi explicado anteriormente, pensou-se que a compactidade relativa deste ensaio era de 95%, mas, durante o andamento desta TESE, um índice de vazios mínimo inferior foi atingido mais tarde.

Os parâmetros de ruptura, assim como os módulos de elasticidade, estão na Tabela 4.11. A Figura 4.32 apresenta a envoltória de ruptura de pico e a equação da envoltória de ruptura onde, a partir dos pontos da envoltória p x q (MIT) foi definido os parâmetros de  $c' = 0$  e  $\phi' = 39,1^\circ$ . A Figura 4.33 apresenta a envoltória de ruptura residual e a equação da envoltória de ruptura onde, a partir dos pontos da envoltória p x q (MIT) foi definido os parâmetros de  $c' = 0$  e  $\phi' = 31^\circ$ .

Tabela 4.11: Parâmetros de ruptura e módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio triaxial

$\sigma'_3$ (kPa)	$\sigma'_1$ (kPa)	q (kPa)	p (kPa)	$E_{50}$ (MPa)
50	259,66	104,83	154,83	138,67
100	419,95	159,98	259,98	69,57
150	671,41	260,71	410,71	56,52
300	1342,74	521,37	821,37	56,15

Fonte: Autor.



A Figura 4.34 apresenta as curvas tensão-deformação plotadas a partir da normalização da tensão efetiva pela tensão confinante ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ ).

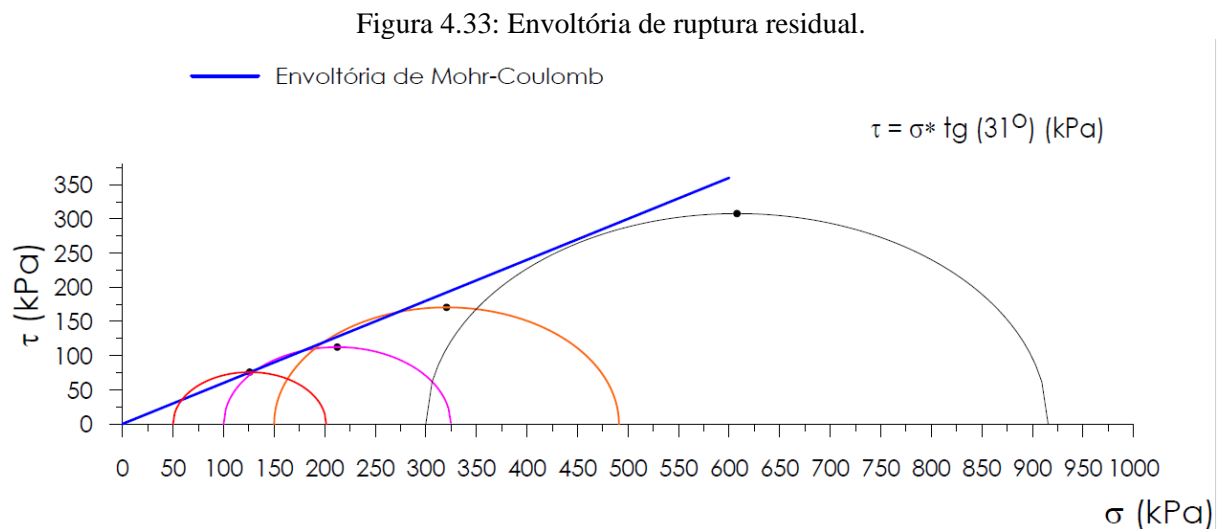
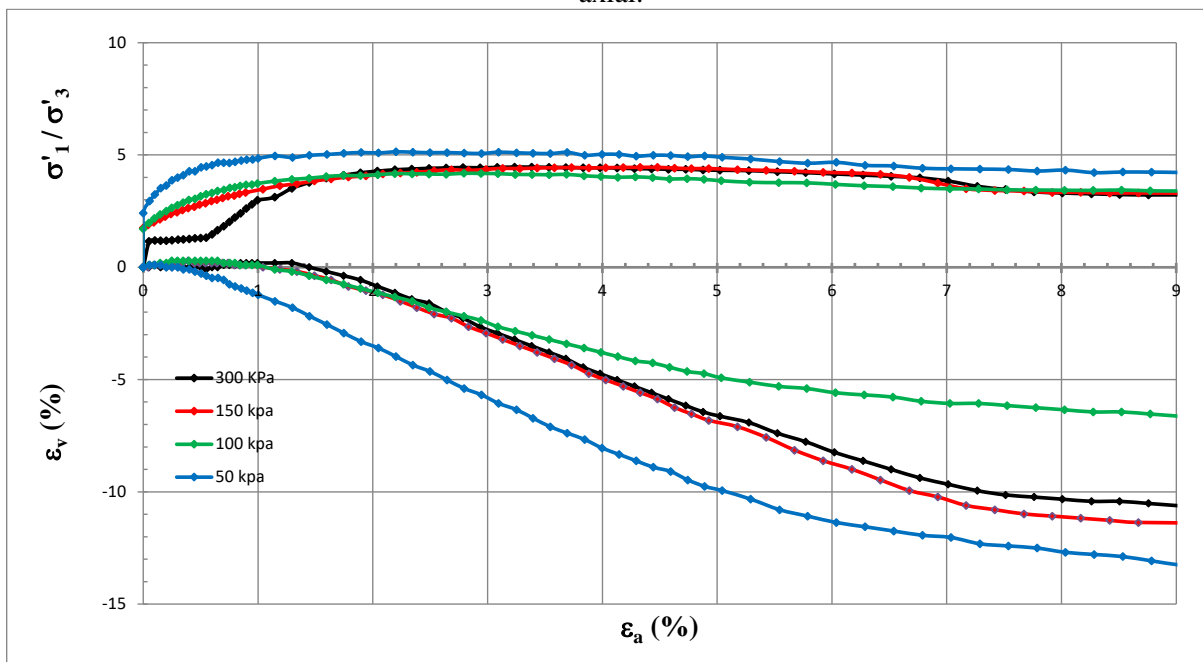
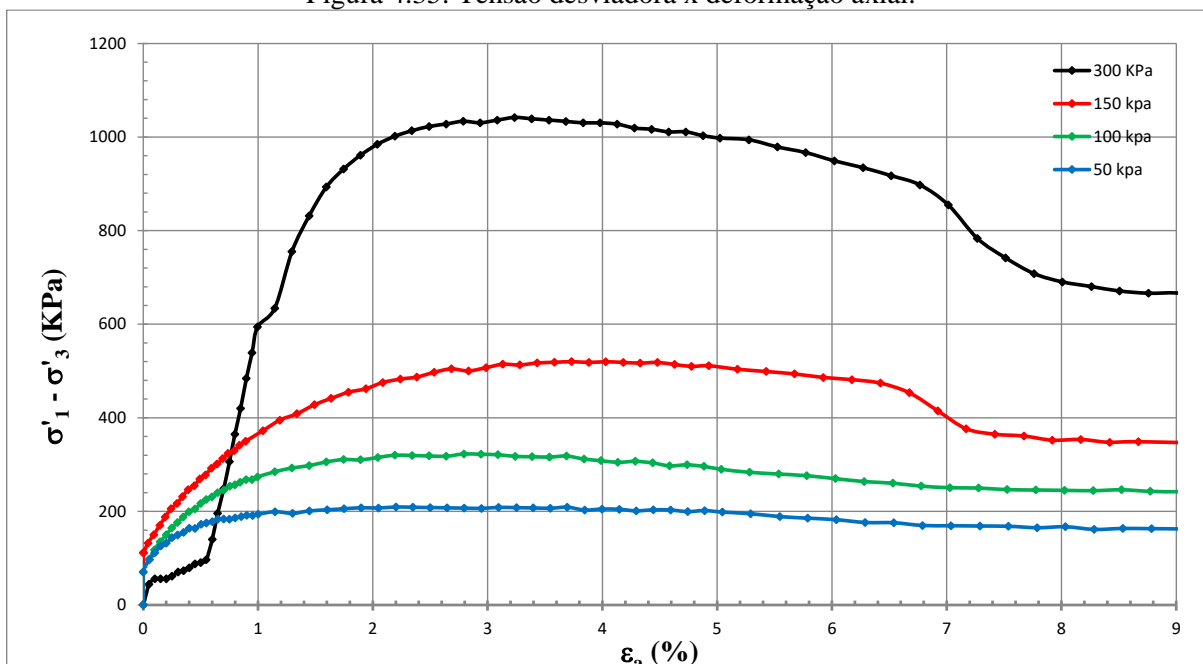


Figura 4.34: Tensão axial normalizada x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial.



Fonte: Autor.

Figura 4.35: Tensão desviadora x deformação axial.



Fonte: Autor.

#### 4.4.5 Comentários sobre os resultados dos ensaios

Os resultados de densidade máxima e mínima mostraram estar em concordância com a literatura internacional para solo similar. Principalmente em relação aos valores do índice de vazios mínimos (areia compacta). O índice de vazios mínimo do solo variou com o



procedimento de ensaio utilizado. Neste caso não foi adequado realizar o ensaio de densidade máxima usando a ABNT.

Ao analisar a Figura 4.34 e Figura 4.35, o ensaio realizado com tensão confinante de 300 kPa teve um comportamento atípico e que durante as análises do ensaio foram excluídas. O que pode ser concluído por meio das Figura 4.34 e Figura 4.35 é que a amostra tem um comportamento de amostra fofa e que com a elevação da tensão confinante (de 50 kPa até 150 kPa) há um aumento da resistência ao cisalhamento. Constata-se também que, assim como apresentado em Lee e Seed (1967), o aumento da tensão confinante produziu: aumento da deformação axial de ruptura e a diminuição gradativa da tendência de expansão do material inicial, seguida da diminuição de volume durante todo o ensaio.

Por meio de ensaios de cisalhamento direto, realizado por Annicchini (2020), o ângulo de atrito de pico para a areia muito compacta encontrado foi de  $39,8^\circ$ , enquanto que para uma areia medianamente compacta encontrou-se nesta tese um valor  $39,1^\circ$ , obtido por ensaio triaxial.

## 4.5 ESTACAS MODELO

### 4.5.1 Considerações iniciais

Neste item será discutido como foi o processo de fabricação das estacas modelo com o auxílio da VÉRTICE/VERCON na fábrica de Belo Horizonte (MG), e a instrumentação das estacas helicoidais no laboratório de Geotecnia da EESC em São Carlos (SP).

### 4.5.2 Fabricação das estacas

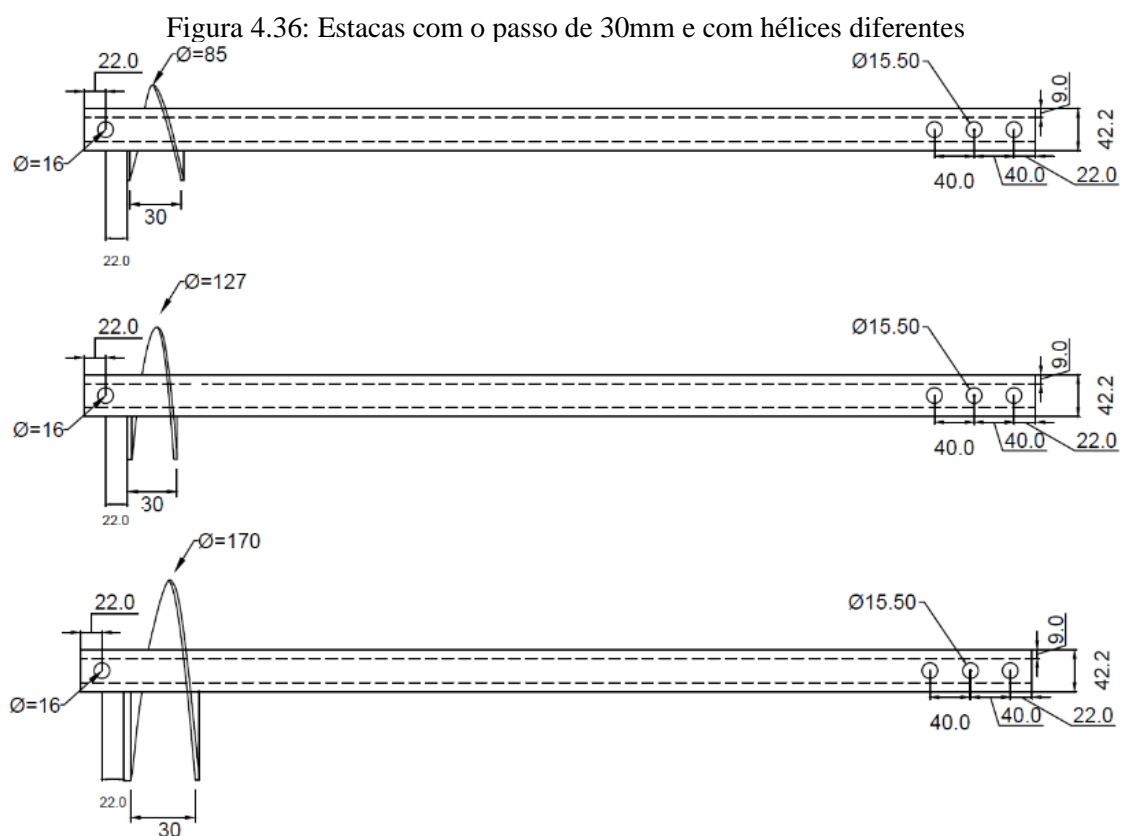
Para realização dos ensaios foi elaborado o projeto de 9 estacas helicoidais simples (1 hélice) com 3 diferentes diâmetros de hélice e 3 diferentes alturas de passo de hélice. Os valores da relação entre diâmetro de hélice e de haste central variou entre 2 a 4 vezes, que são valores típicos da prática deste tipo de estacas.

Na presente pesquisa foram testadas apenas 3 estacas modelos com diferentes diâmetros e mesmo passo. Portanto, as outras 6 estacas modelo que foram fabricadas serão utilizadas em pesquisas futuras para investigar o efeito do tamanho do passo da hélice no seu comportamento.

O tubo central da estaca tem diâmetro externo de 42 mm e parede de 9 mm de espessura. Para fabricação das estacas, 4 tubos com 6 metros de comprimento cada foram doados pela

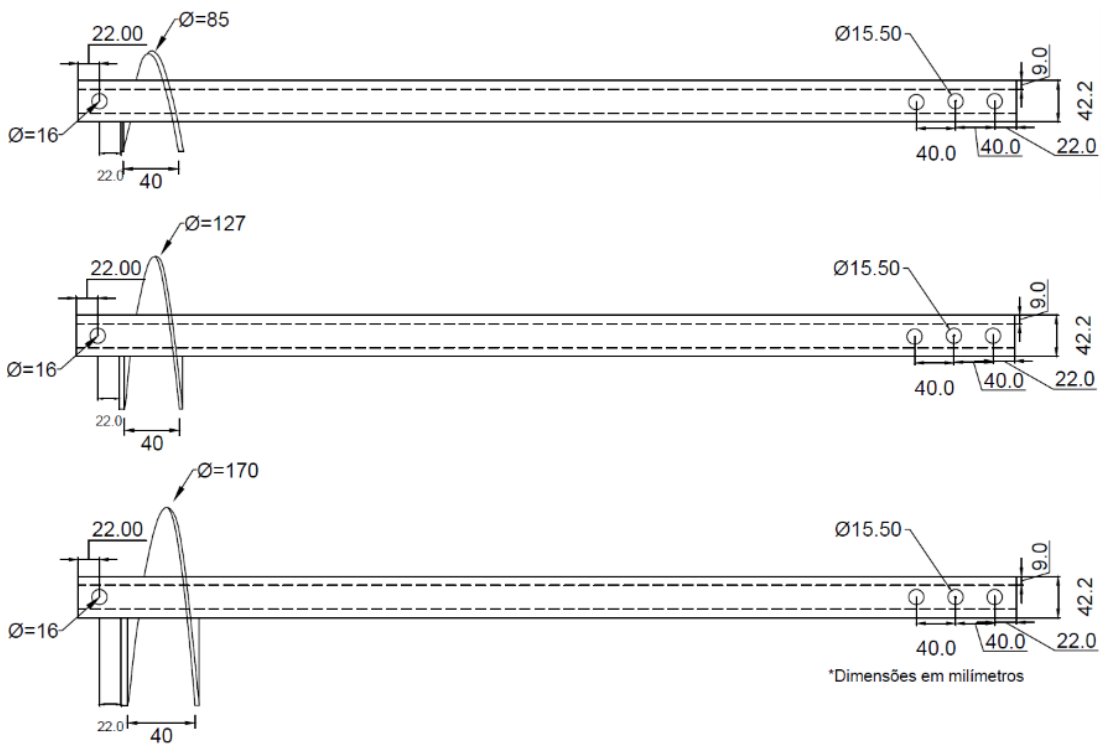
empresa Vallourec. A empresa Vercon fez os furos nos tubos estabelecidos pelo projeto que o autor fez para instrumentação da estaca e soldou hélices com 85 mm, 127 mm e 170 mm de diâmetro nos tubos.

Além do trabalho de furação e solda das hélices na estaca, a empresa Vercon comprou as chapas de aço de 6.4 mm ( $\frac{1}{4}$ "') de espessura e cortou as hélices na máquina de plasma. A máquina de plasma é utilizada na empresa para cortar as hélices pois não gera rebarba e economiza tempo operação para executar tal procedimento. Foram usadas hélices com passos diferentes de 30 mm, 40 mm e 50 mm de altura. Na Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38 são apresentadas os projetos das 9 estacas, com passos de diâmetro de hélices diferentes.



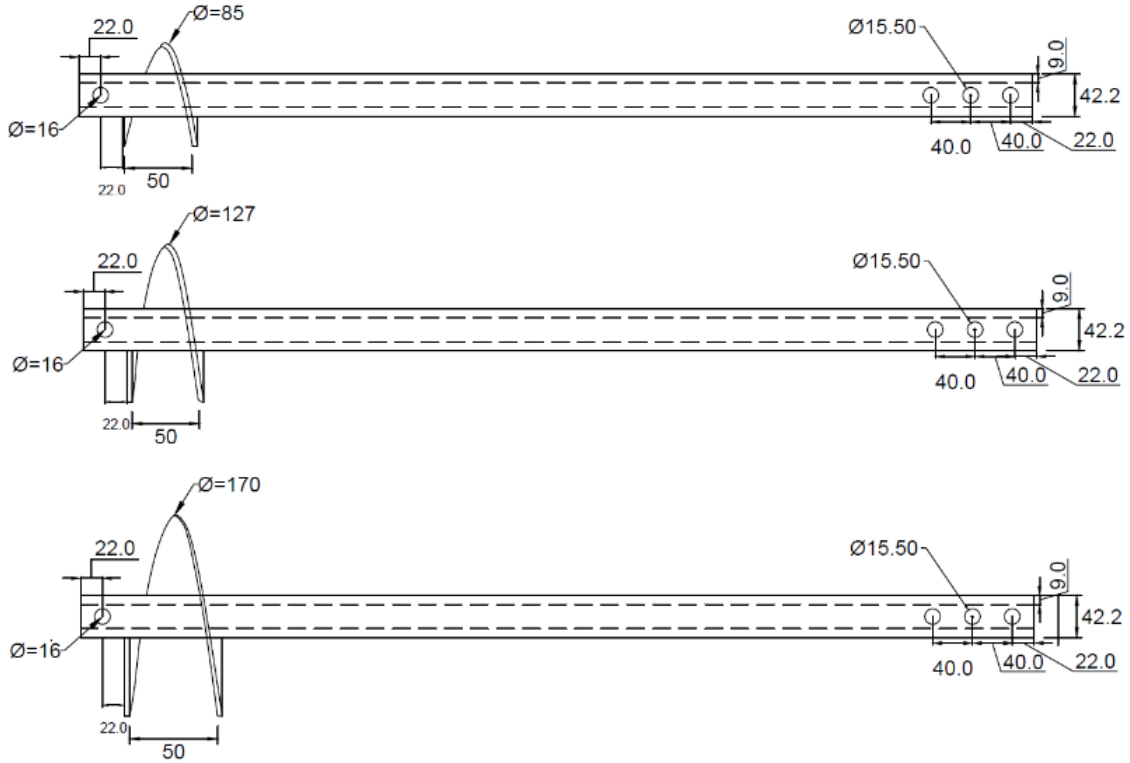
Fonte: Autor.

Figura 4.37: Estacas com o passo de 40mm e com hélices diferentes



Fonte: Autor.

Figura 4.38: Estacas com o passo de 50mm e com hélices diferentes



Fonte: Autor.

A Tabela 4.12 resume as propriedades geométricas de todas as estacas helicoidais fabricadas pela VERCON/VÉRTICE ENGENHARIA para esta pesquisa. A instrumentação de todas as estacas foi calibrada no laboratório de geotecnia da EESC em São Carlos, conforme será visto no item a seguir.

Tabela 4.12: Propriedades geométricas das estacas helicoidais fabricadas

Tipo	Altura do passo (mm)	Diâmetro da hélice (mm)	Diâmetro da haste (mm)	Razão D/d
1	40	85	42,2	2,0
2	40	127	42,2	3,0
3	40	170	42,2	4,0
4	30	85	42,2	2,0
5	30	127	42,2	3,0
6	30	170	42,2	4,0
7	50	85	42,2	2,0
8	50	127	42,2	3,0
9	50	170	42,2	4,0

Fonte: Autor.

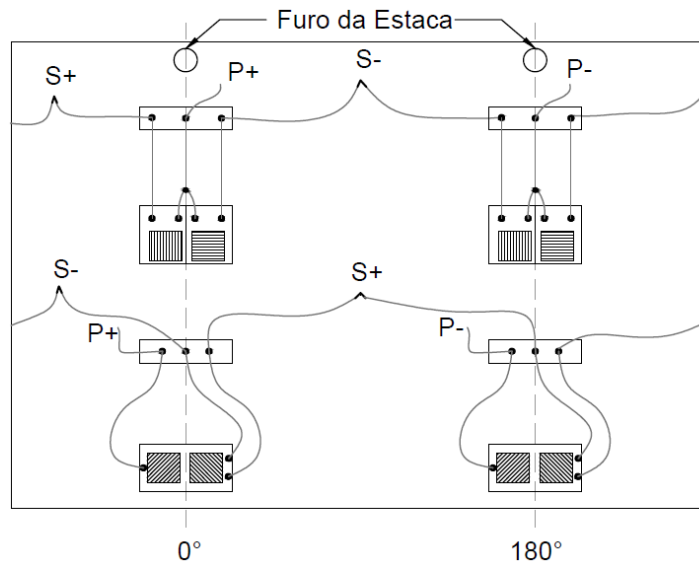
#### 4.5.3 Instrumentação das estacas helicoidais

O objetivo da instrumentação das estacas modelo foi separar a capacidade de carga da hélice e a resistência por atrito lateral na haste durante os ensaios de carregamento da estaca. A instrumentação foi montada usando-se extensômetros elétricos (“*strain gages*”) arranjados em forma de ponte completa de Wheatstone, montadas de acordo com o esforço a ser medido. Os esforços a serem medidos são de força axial e torque. Para medição da força axial, foi feita ponte completa com 2 extensômetros ativos, modelos bidirecionais simples BF 350-3BB (11). Para medição do torque, foi feita ponte completa com 2 extensômetros ativos, modelos bidirecionais a 45° BF 350-3HA - A (11). A constante  $K = 2,00 \pm 1\%$  para o modelo biaxial e  $K = 2,09 \pm 1\%$  para o modelo bidirecional a 45°.

Os extensômetros utilizados são para aço, do tipo coláveis, com base de poliamida e resistência nominal de 350  $\Omega$ . Sendo fabricadas e comercializadas pela GEOINSTRUMENTAÇÃO. A montagem dos “*strain gages*”, foi feita de modo similar a montagem de Santos Filho (2014), conforme a Figura 4.39, que mostra os circuitos de medição montado em cada seção instrumentada. As ligações dos circuitos foram feitas utilizando-se cabo Vishay modelo 326-DFV. Este cabo possui três fios condutores de cobre estanhados com 0,404

mm de diâmetro (26 AWG) e é indicado para usos gerais. Após efetuadas as ligações, os cabos foram inseridos no interior da estaca por meio de um furo de diâmetro de 6 mm no tubo, como apresentado na Figura 4.39.

Figura 4.39: Disposição dos extensômetros e ligações dos circuitos de medição



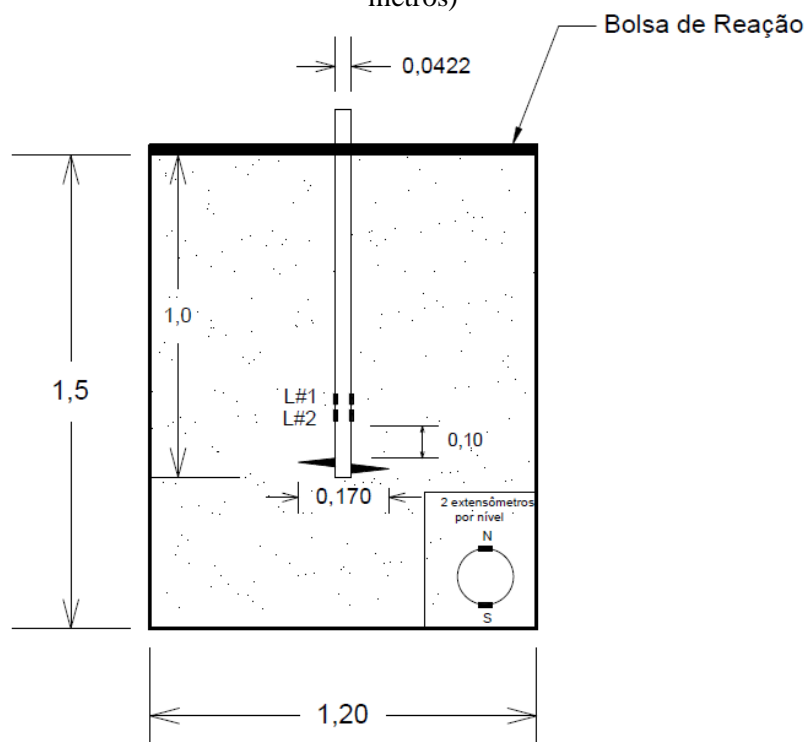
Fonte: Autor.

Devido as formas de ligação adotadas, em cada seção instrumentadas foram necessários seis fios condutores, denominados P+, P-, S+, S-, P'+ e S'-, e, portanto dois cabos de ligação (Figura 4.39). No entanto, como estes cabos são considerados frágeis, optou-se por fazer a condução utilizando cabos de maior resistência mecânica. Os cabos utilizados foram do tipo flexível PP de seção nominal 4 x 1,0 mm<sup>2</sup>. A emenda dos cabos foi realizada utilizando-se solda de estanho, e para impermeabilização aplicou-se fita isolante de auto-fusão.

Os extensômetros foram colados na superfície das estacas com 2 níveis (L1 para força e L2 para o torque) para determinar a distribuição de carga durante o ensaio de carregamento estático e o torque resistido na estaca durante a instalação. Os níveis de extensômetros L1 e L2 ficaram aproximadamente a 20 mm equidistantes um dos outros conforme mostra a Figura 4.40, e o L2 próximo à hélice. Em cada nível, os 2 extensômetros foram colados na superfície da estaca a norte e sul em 90°.

Os extensômetros foram protegidos com Plasteel, um tipo resina epóxi reforçado com resinas de aço. Esta resina é usada para vários tipos de reparos de peças de aço expostos a tensões de tração, compressão, torção e flexão. A resina protege o “*strain gauge*” de danos durante a instalação da estaca helicoidal.

Figura 4.40: Posição dos *strain gauges* na estaca dentro da câmara de calibração (dimensões em metros)



Fonte: Autor.

A preparação da superfície e a colagem dos extensômetros foi feita seguindo um “passo-a-passo” disponível nesta tese para facilitar e auxiliar trabalhos futuros no grupo de fundações da EESC. Esse passo-a-passo encontra-se no APÊNDICE A – Procedimento para aplicação dos extensômetros.

A Figura 4.41 apresenta as 3 estacas modelo instrumentadas utilizadas nos ensaios desta pesquisa (estacas P1, P2 e P3 da Tabela 4.12).

Figura 4.41: Estacas modelo utilizadas nos ensaios na câmara de calibração.



Fonte: Autor

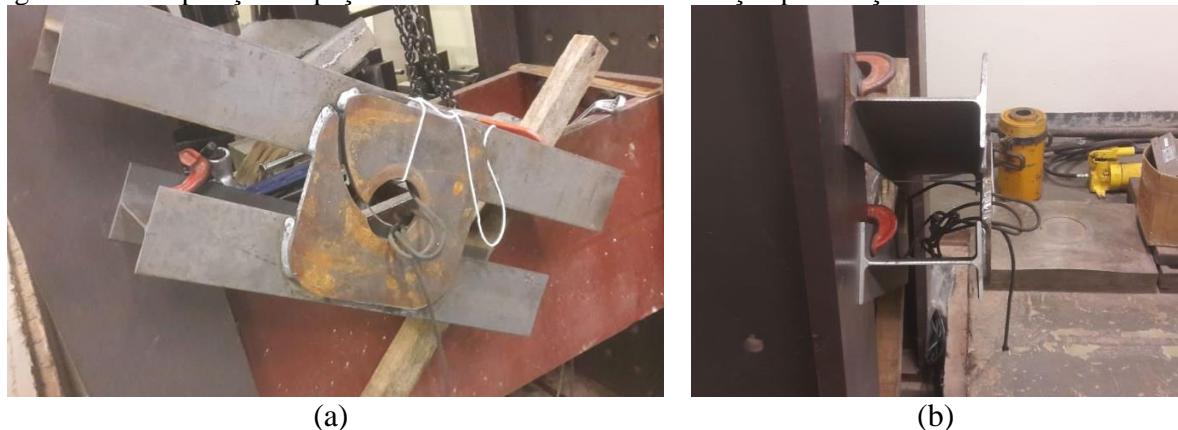
#### 4.5.4 Calibração da instrumentação (Tração e Torque)

A calibração das estacas instrumentadas foi feita no laboratório de mecânica das rochas da EESC no departamento de Geotecnia. Algumas peças metálicas tiveram que ser feitas na oficina mecânica da EESC/USP para realização de tração e de torque na estaca. A

Figura 4.42 a seguir mostra as peças utilizadas para executar a tração da estaca no equipamento de cisalhamento direto de rochas no Laboratório de Mecânica das rochas. O objetivo consiste em passar a haste central da estaca no centro da peça, e com o macaco vazado (amarelo) que se encontra na

Figura 4.42(b), “puxar” a estaca até 80% do limite estrutural da peça para exercer uma força de tração de modo gradual. Quando se chegou ao valor de 80% do limite estrutural da peça, foi diminuindo a força de modo gradual, para que fosse obtida assim uma curva de calibração. As curvas de calibração e o passo a passo de como foram feitas as calibrações encontra-se no APÊNDICE C – Calibração das estacas helicoidais.

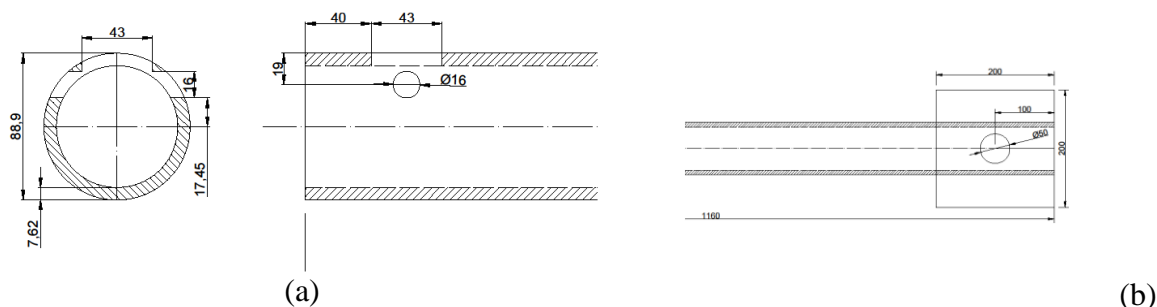
Figura 4.42: Disposição da peça metálica a ser usada na calibração para tração da estaca instrumentada



Fonte: Autor.

O desenho da Figura 4.43 mostra a peça produzida pela oficina Mecânica da EESC/USP para executar o torque na estaca. A ideia foi que esta peça fosse o “braço de alavanca” para executar o torque na estaca instrumentada, de modo a “girar” a estaca até 80% do limite estrutural da peça de modo gradual. Quando se chegou ao valor de 80% do limite estrutural da peça, diminuiu-se a força de modo gradual, para que fosse obtida assim uma curva de calibração. As curvas de calibração e o passo a passo de como foram feitas as calibrações encontra-se no APÊNDICE C – Calibração das estacas helicoidais.

Figura 4.43: Desenho da peça a ser usada na calibração para torque da estaca instrumentada



Fonte: Autor.

## 4.6 CÉLULAS DE TENSÃO USADAS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

### 4.6.1 Considerações iniciais



Neste item será mostrado como foi o processo de fabricação e a instrumentação das células de tensão total pela empresa Geo Instrumentos.

#### 4.6.2 Fabricação das células de tensão total

A fabricação das células de tensão total foi feita pela empresa GEO Instrumentos localizada na cidade de São Carlos. O objetivo foi que a célula fosse a menor possível para evitar que interferisse nos resultados experimentais dentro da câmara de calibração. Nesse sentido, foram fabricadas com 20 mm de diâmetro e espessura de 7 mm. A linearidade das células é de 1%, a resistência é de  $350\Omega$  e a tensão de alimentação é 10Vdc Máx. A seguir a Tabela 4.13 mostra o número das células, as capacidades das células em kPa e a sensibilidade (pressão hidrostáticas) das células fabricadas.

Tabela 4.13: Constantes de calibração das células de tensão total

Célula nº	Capacidade (kPa)	Sensibilidade mV/V. FS
180501	500	1,6160mV/V@500kPa
180508	500	2,5620mV/V@500kPa
180509	500	1,8870mV/V@500kPa
180504	500	1,6090mV/V@500kPa
180510	1000	1,0430mV/V@1MPa
180503	1000	1,1030mV/V@1MPa

Fonte: Autor.

A Figura 4.44 mostra as 6 células que foram fabricadas em parceria com GEO Instrumentos. Infelizmente as células de tensão total são muito caras e normalmente quando se trata de minicélulas de tensão total, são mais caras ainda. Elas normalmente são fabricadas por empresas estrangeiras e importadas para o Brasil, por isso, o preço é tão elevado. Sabendo-se disso, procuramos a GEO Instrumentos, que é uma empresa brasileira atuante no mercado de instrumentação Geotécnica há mais de 30 anos e tem vasta experiência em calibrações de instrumentos geotécnicos.

Figura 4.44: Células de tensão total fabricadas



Fonte: Autor.

#### 4.6.3. Calibração das células de tensão total

A calibração das células de tensão total foi realizada pela própria empresa que fabricou as células. Segundo o fabricante (GEO Instrumentos), as células foram colocadas dentro de uma câmara de calibração pequena, e foi aplicada ar comprimido até sua capacidade máxima. Nas células com capacidades de 500 kPa foi aplicado ar comprimido até a pressão de 500kPa e nas células de 1MPa foram aplicados pressão de ar comprimido de até 1MPa. Deste modo, temos as constantes de calibração para cada uma das células.

### 4.7 ENSAIOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

#### 4.7.1 Considerações iniciais

O objetivo dos ensaios desta pesquisa foi avaliar separadamente os efeitos da área da hélice (razão  $D/d$ , onde  $D$  = diâmetro da hélice, e  $d$  = diâmetro da haste tubular) e da tensão de sobrecarga vertical (profundidade) nas forças de instalação e no comportamento em tração e em compressão deste tipo de fundação. Portanto, para este fim foram realizados 9 ensaios em câmara de calibração para esta pesquisa. Para cada um dos 3 modelos de estacas (diferentes

diâmetros de hélice) foram realizados ensaios em 3 condições distintas de tensão de sobrecarga vertical: 50, 100 e 150 kPa. Para cada ensaio foi preparada uma amostra nova de areia na condição muito compacta, com compactidade relativa em torno de 95%.

#### 4.7.2 Execução dos Ensaio

Cada um dos nove ensaios foi dividido em três etapas:

- 1) Preparo da amostra de areia, com instalação dos sensores dentro do solo para medir as tensões radiais no entorno da estaca durante as fases de instalação e carregamento.
- 2) Instalação da estaca modelo após as tensões medidas na amostra de areia pelos sensores estabilizarem.
- 3) Ensaio de carregamento à tração, seguido do ensaio de carregamento à compressão.

A Tabela 4.14 apresenta a nomenclatura dos ensaios e as propriedades geométricas das estacas em cada ensaio realizado.

Tabela 4.14: Propriedades geométricas das estacas helicoidais ensaiadas

Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	Diâmetro da hélice, D (mm)	Diâmetro da haste, d (mm)	Razão D/d	Passo da hélice (mm)	Profundidade da ponta da estaca (mm)
T1	50						
T2	100	P1	85	42	2	40	1000
T3	150						
T4	50						
T5	100	P2	127	42	3	40	1000
T6	150						
T7	50						
T8	100	P3	170	42	4	40	1000
T9	150						

Fonte: Autor.

As estacas helicoidais foram instaladas em areia preparadas para simular condições de campo de compactidade relativa de aproximadamente 95%, equivalente a uma areia muito compacta. O procedimento de montagem e como foram feitas as chuva de areia encontra-se no APÊNDICE D – Procedimento para montagem do “chuveiro”, execução da chuva de areia.

Durante o processo da chuva de areia foram colocados sensores de pressão no interior do solo, com o objetivo de medir o desenvolvimento das tensões radiais na areia no entorno da estaca, durante a instalação e no carregamento, conforme mostra a Figura 4.45. A chuva de areia era interrompida nas profundidades determinadas para a instalação dos sensores, que ficavam com a face perpendicular em direção ao local de instalação da estaca modelo, para medir a variação das tensões radiais (horizontais) no solo em torno da estaca.

Figura 4.45: Células de pressão sendo posicionadas dentro da câmara de calibração



Fonte: Autor.

Também foram instalados em alguns ensaios dois transdutores de tensão para medir as tensões verticais nas partes superior e inferior da amostra. No entanto estes sensores tiveram problemas e os resultados não são confiáveis, e por isso foram descartados e não são apresentados nesta tese.

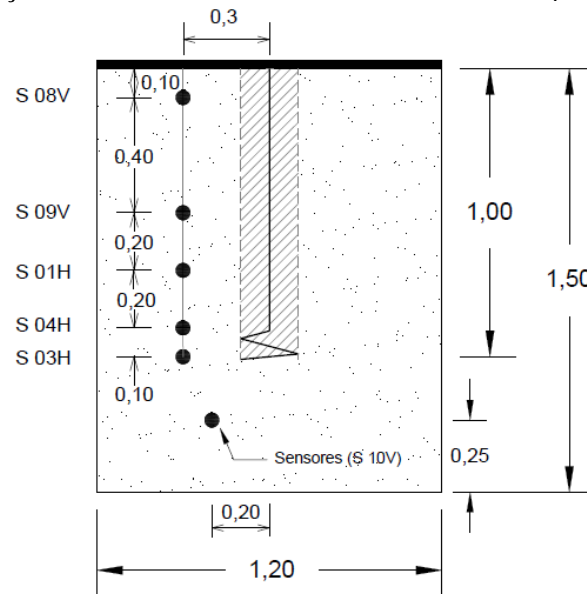
A localização dos transdutores de pressão que mediram as tensões verticais e horizontais ficaram no perímetro de um círculo concêntrico imaginários de 0,30 m de diâmetro, com seus centros representados pela haste da estaca helicoidal. Em relação a elevação, o espaçamento vertical entre as unidades é de 10 cm, 50 cm, 70 cm, 90 cm e 100 cm da tampa até ao limite da ponta da estaca helicoidal e logo abaixo da ponta da estaca o espaçamento vertical é de 20 cm.

A Figura 4.46 mostra a configuração final dos sensores dentro da câmara de calibração. Nesta figura, os sensores com o símbolo “V” foram instalados para medir as tensões verticais (estes que tiveram problemas), e os sensores com o símbolo “H” foram instalados para medir as tensões horizontais (radiais).

O principal objetivo do uso destes sensores foi medir a variação das tensões radiais na região de solo logo acima da hélice da estaca. Os sensores para medir as tensões verticais (que falharam) foram instalados apenas para verificar as tensões verticais na amostra. No entanto foi

feita esta verificação por meio dos resultados das tensões horizontais na areia em repouso (antes de iniciar a instalação da estaca), que ficou em torno de 0,4-0,5 vezes o valor da sobrecarga vertical aplicada pela membrana pressurizada (valor razoável para coeficiente de empuxo em repouso de areias compactas). Essa checagem era feita para verificar se as tensões de sobrecarga realmente chegam na profundidade onde os sensores foram instalados.

Figura 4.46: Localização das células de tensão na câmara de calibração (dimensões em metros)



Fonte: Autor.

Após o preparo do maciço de solo com o auxílio do “chuveiro”, a instalação da estaca helicoidal foi realizada com o auxílio do sistema de instalação. O sistema de instalação é formado por duas partes, conforme mostra a Figura 4.47.

Com auxílio de um pórtico rolante, posiciona-se a base (1ª parte) do sistema de instalação na tampa da câmara de calibração e parafusava-se os pés da base na tampa. Em seguida, colocava-se a segunda parte do sistema na base e parafusava-se as duas partes, tornando-se o sistema de instalação. Por fim, conectava-se a rosca, com o passo igual ao da hélice a ser instalada, no topo da estaca. O motor é acionado por uma botoeira trifásica, que faz com que a rosca avance e retorne quando necessário.

Conforme mostra a Figura 4.47(a), o sistema de instalação tem uma rosca que está presa na cabeça da estaca e que é girada pela corrente que está presa ao motor. Esta rosca tem o mesmo passo da estaca. O objetivo dela é que durante a rotação da estaca, o avanço da estaca no solo fosse constante, com um passo por rotação. Entre as duas partes do sistema de instalação, existe uma peça fixa (Figura 4.47(b)) que auxilia a rosca “empurrar” a estaca

conforme ela gira. Conforme sugere Perko (2009), evita-se que o avanço seja muito menor que o passo e provoque o efeito de tradagem, sem afetar ainda mais significativamente a capacidade de carga da estaca helicoidal.

Antes de começar a instalação, enchia-se a bolsa de reação com ar comprimido na pressão desejada, e aguardava-se até que a deformação da areia abaixo da bolsa estabilizasse. Esta estabilização era verificada pelas medidas feitas pelos sensores de pressão instalados na areia, por meio do sistema de aquisição de dados.

A pressão da bolsa de reação possibilita a simulação de uma parcela da estaca (região da ponta) submetida a uma tensão efetiva no solo nas profundidades de aproximadamente 2,9m, 5,7 m e 8,5 m (pressão na bolsa de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente), conforme ilustrado na Figura 4.48. A pressão de ar comprimido que entrava na bolsa era controlada por um manômetro calibrado.

Infelizmente, por questões físicas (altura do contêiner), a instalação foi feita em 2 etapas: primeiro instalava-se a estaca por aproximadamente 70 cm dentro da amostra de areia na câmara de calibração, parava-se a instalação e trocava-se a luva (Figura 4.47b) que conectava a rosca e a cabeça da estaca, para continuar a instalação dos 30 cm finais. Depois de instalada a estaca com a hélice na profundidade de 1 metro, desmontava-se todo o sistema para que seja montada a estrutura de reação. O torque de instalação e a velocidade de avanço das estacas foram medidos e filmados constantemente durante toda a profundidade de instalação. Todas as estacas foram instaladas com velocidade de 12 rpm.

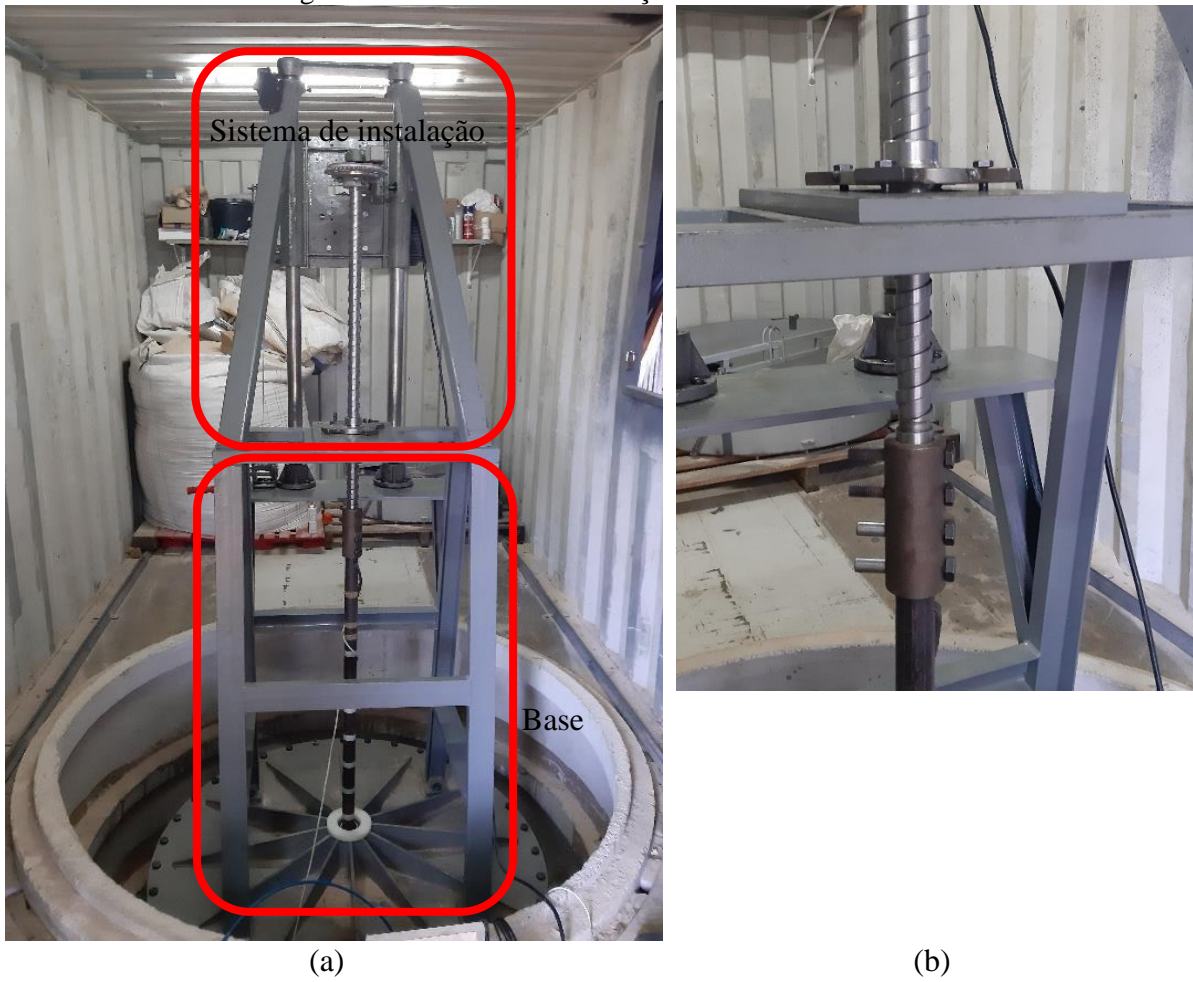
Após a instalação da estaca, com a ajuda do pórtico rolante e da talha manual, era montada a estrutura de reação. Primeiro, era realizado o ensaio de tração. Posicionava-se o macaco hidráulico vazado e a célula de carga em cima do cavalete (estrutura de reação), uma barra DYWIDAG conectava o topo da estaca helicoidal que era empurrado pelo macaco vazado e arrancava a estaca da câmara de calibração.

Ao final do ensaio de tração, trocava-se a posição do macaco hidráulico e a célula de carga para baixo da estrutura, de modo a empurrar a estaca e realizar o ensaio de compressão. A Figura 4.49 mostra como foi montado o ensaio quando era feita o ensaio à tração e à compressão. Em ambos os ensaios, foram utilizados 2 relógios comparadores com deslocamento máximo de 50 mm. Eles foram posicionados diametralmente no topo da estaca para medir o deslocamento da estaca em cada estágio de carga.

Os ensaios de tração e a compressão nas estacas modelo foram realizados de acordo com os procedimentos de provas de carga (ensaio rápido) da norma brasileira NBR12131. As leituras

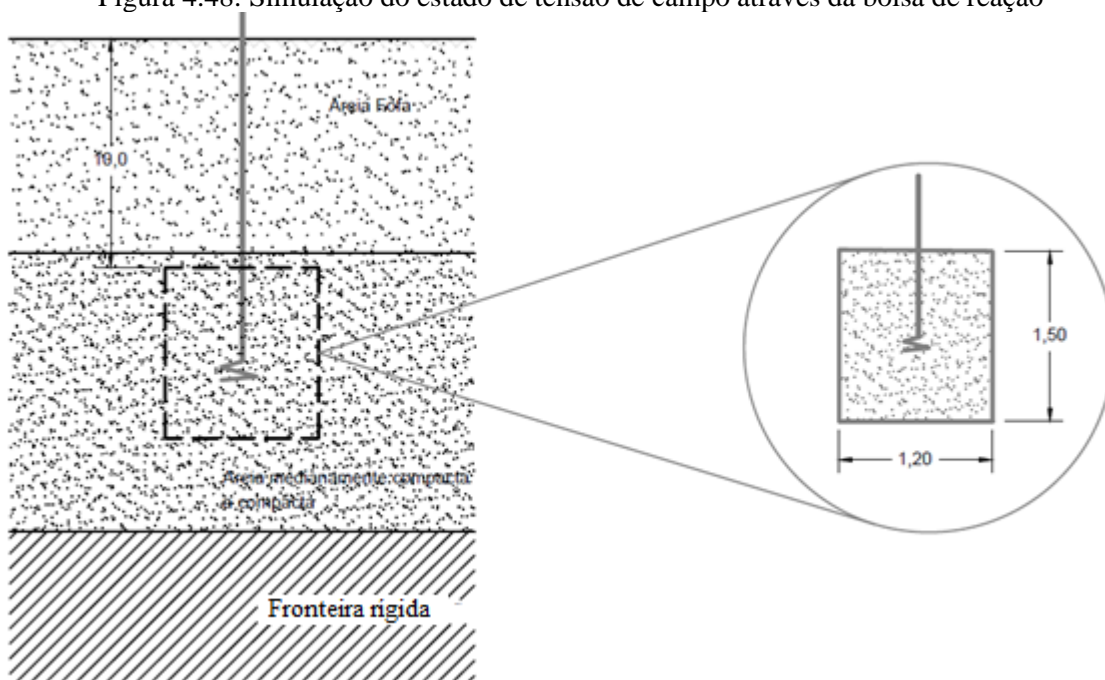
de deslocamentos durante os ensaios foram feitas por meio de relógios comparadores, como indicado na Figura 4.50.

Figura 4.47: Sistema de instalação da estaca helicoidal



Fonte: Autor.

Figura 4.48: Simulação do estado de tensão de campo através da bolsa de reação



Fonte: Autor.

Figura 4.49: Sistema de instalação da estaca helicoidal (a) Tração e (b) Compressão



Fonte: Autor.



Figura 4.50: Registro dos deslocamentos nos ensaios de carregamento das estacas modelo.



Fonte: Autor.

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados pelo autor, executados conforme descrito no Capítulo 4.

### 5.2 ENSAIOS REALIZADOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

#### 5.2.1. Considerações iniciais

Os resultados dos ensaios realizados na câmara de calibração serão mostrados por itens: instalação, tração e compressão. Para facilitar o entendimento durante as análises, serão apresentados por estaca nas suas respectivas tensões de sobrecarga vertical (50, 100 e 150 kPa).

#### 5.2.2 Instalação das estacas helicoidais

##### 5.2.2.1 Resultados medidos nas estacas na instalação

A Figura 5.1 e Figura 5.2 mostram os valores de torque e força axial registrados acima da hélice durante a instalação da estaca P1 ( $D = 85$  mm) até a profundidade de aproximadamente 700 mm, com sobrecarga de 50, 100 e 150 kPa (ensaios T1, T2 e T3 da Tabela 4.14). Os ensaios realizados na estaca P1 com 50 kPa de sobrecarga vertical pelo presente autor foram substituídos pelos ensaios executados por ANNICCHINI (2020), pois os ensaios de ANNICCHINI (2020) ficaram mais coerentes quando analisados juntamente com os ensaios 100 e 150 kPa.

Após a pausa da instalação (em torno de 700 mm) em todos os ensaios da pesquisa, quando a estaca foi descarregada e carregada novamente, os resultados da instrumentação do trecho final de instalação foram influenciados (tensões residuais provavelmente) e podem não representar adequadamente o torque necessário para se instalar a hélice da estaca na amostra.

No entanto, como o torque necessário para “instalar a hélice no solo” deve ser constante ao longo da profundidade da amostra até o fim da instalação, visto que a tensão confinante não

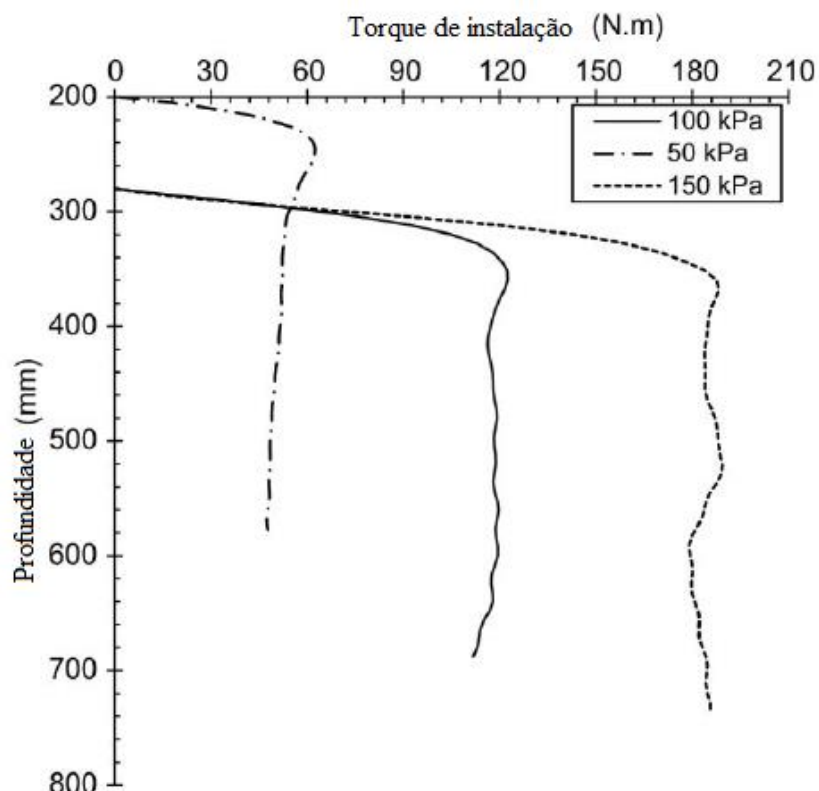
varia, e o efeito de aumento gradual de haste penetrada nos resultados de torque foi eliminado, já que o torque foi medido na instrumentação logo acima da hélice.

No mais, em ensaios similares realizados em Nagai *et al* (2018), a variação do torque de instalação foi bem parecida com a primeira parte da instalação aqui apresentada, ou seja, mostraram que o torque na hélice da estaca aumentou gradualmente conforme a estaca penetrava e após uma profundidade arbitrária tornou-se constante ao longo da profundidade. Por conta deste fato supracitado, foi adotado nesta tese para fins de análise o valor do torque médio ( $T_{\text{méd}}$ ) após o pico inicial medido até o momento da pausa (em torno de 700 mm de profundidade) e o valor do torque no momento da pausa ( $T_{\text{pausa}}$ ).

Deste modo, neste capítulo de resultados e análises, não serão apresentados os valores registrados após a pausa da instalação.

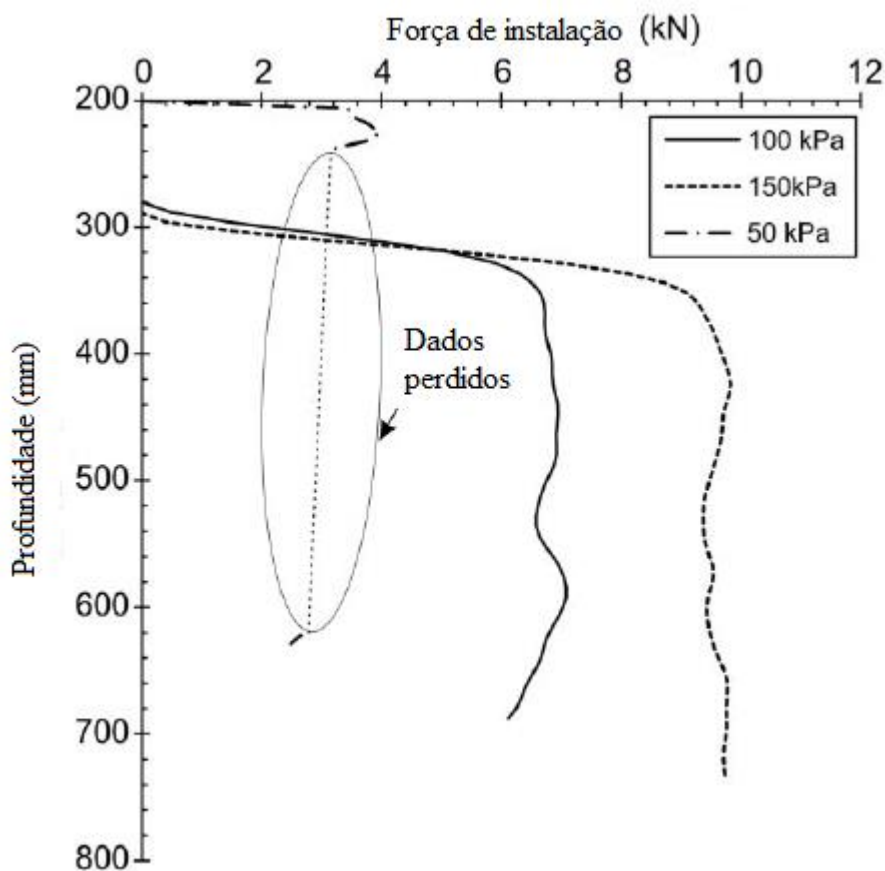
Conforme mostra a Figura 5.1, como esperado, quanto maior a tensão de sobrecarga vertical dentro da câmara de calibração, maior o torque de instalação da estaca. No início da instalação, o torque acima da hélice aumentou gradualmente até chegar um valor de pico, após este valor, à medida que a estaca penetrava tornava-se quase constante até o final da pausa da instalação.

Figura 5.1: Torque x Profundidade de instalação da estaca P1.



Fonte: Autor.

Figura 5.2: Força x Profundidade de instalação da estaca P1.



Fonte: Autor.

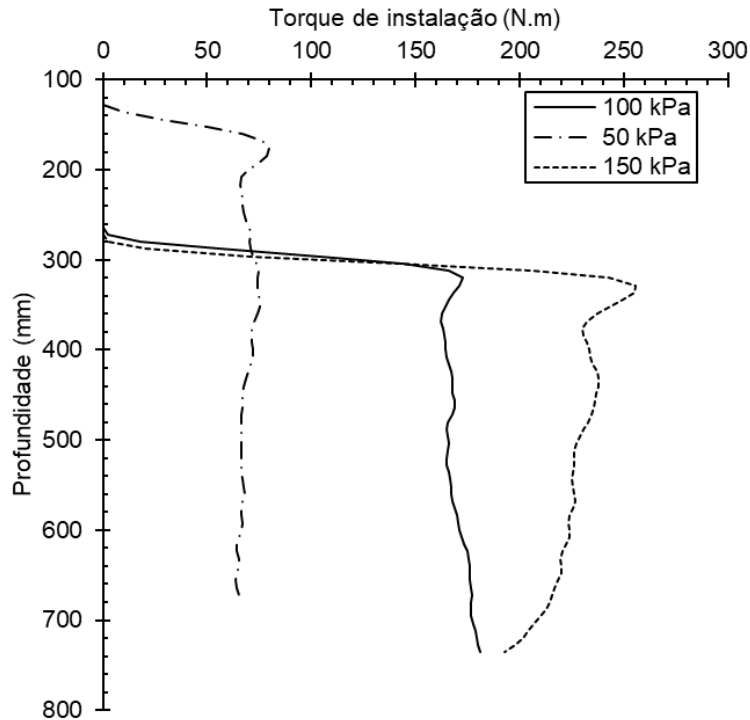
Na Figura 5.2, o ensaio com sobrecarga de 50 kPa ocorreu problemas na instrumentação durante a instalação, que segundo o ANNICCHINI (2020) após a finalização do ensaio os dados foram perdidos. Nota-se nesta figura que conforme aumentava-se a tensão de sobrecarga vertical dentro da câmara de calibração, maior era a força axial de instalação, como no caso do torque.

Quando a instalação sofre a pausa, a força não retorna a zero, ficando uma força residual na estaca, que vai caindo lentamente até chegar a zero. Isto também ocorreu nos ensaios realizados em Nagai *et al.* (2017). Portanto, conforme adotado para a análise do torque, para os valores de força vertical de instalação, serão utilizados os valores médios ( $V_{méd}$ ) computando os valores logo após o pico da curva até mais ou menos 700 mm de profundidade quando ocorre a pausa da instalação e o valor da força vertical no momento da pausa ( $V_{pausa}$ ).

A Figura 5.3 e Figura 5.4 mostram os valores de torque e força axial registrados acima da hélice durante a instalação da estaca P2 ( $D = 127$  mm) até a profundidade de

aproximadamente 700 mm, com sobrecarga vertical de 50, 100 e 150 kPa (ensaios T4, T5 e T6 da Tabela 4.14)

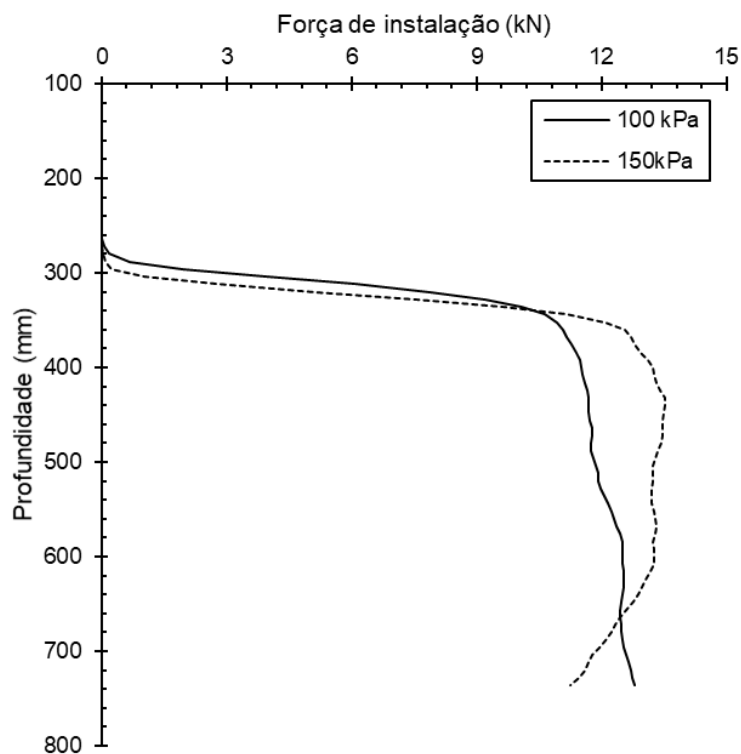
Figura 5.3: Torque x Profundidade de instalação da estaca P2.



Fonte: Autor.

A Figura 5.3 mostra para a estaca P2, assim como para a estaca P1, que conforme aumentava-se a tensão de sobrecarga vertical dentro da câmara de calibração, maior era o torque para instalar a estaca. Pelo mesmo motivo da estaca P1, nas análises futuras, os valores de torque durante a instalação, será utilizado os valores médios ( $T_{méd}$ ) computando os valores logo após o pico da curva até mais ou menos 700 mm de profundidade quando ocorre a pausa da instalação e o valor do torque no momento da pausa ( $T_{pausa}$ ). Não será considerado os valores após a pausa da instalação.

Figura 5.4: Força x Profundidade de instalação da estaca P2.

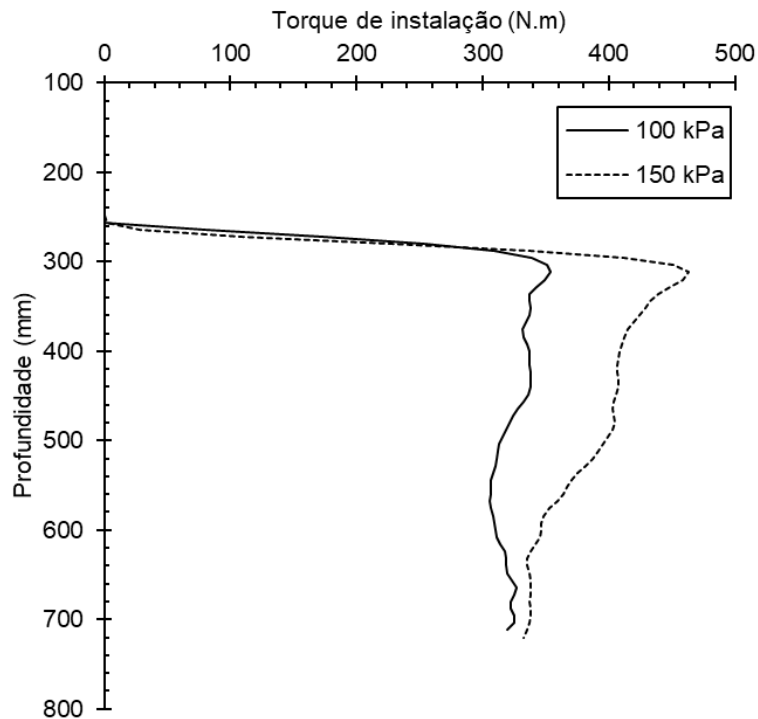


Fonte: Autor.

Na Figura 5.4, não mostra a leitura da tensão de 50 kPa, infelizmente durante a instalação, o fio de ligação do “*strain gauge*” foi danificado pela areia.

A Figura 5.5 e Figura 5.6 mostram os valores de torque e força axial registrados acima da hélice durante a instalação da estaca P3 ( $D = 170$  mm) até a profundidade de aproximadamente 700 mm, com sobrecarga vertical de 50, 100 e 150 kPa (ensaios T7, T8 e T9 da Tabela 4.14)

Figura 5.5: Torque x Profundidade de instalação da estaca P3.

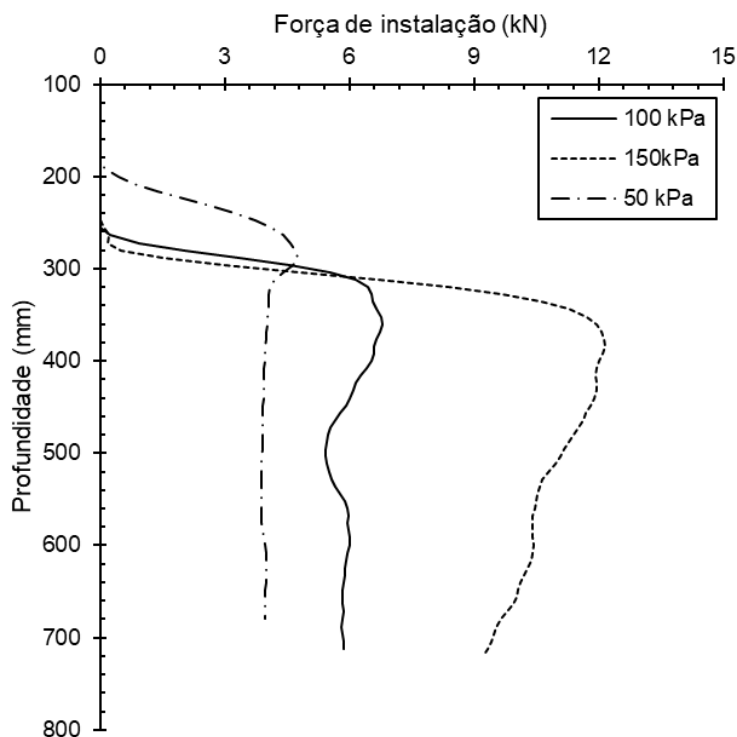


Fonte: Autor.

Conforme mostra a Figura 5.5, não tem a leitura de torque para o ensaio com a sobrecarga vertical de 50 kPa, infelizmente durante a instalação, o fio de ligação do “*strain gauge*” foi danificado pela areia. Nesta figura observa-se que conforme aumenta-se a tensão de sobrecarga vertical dentro da câmara de calibração, maior era o torque da estaca.

Na Figura 5.6, pode-se observar que como os valores de torque da Figura 5.5, conforme aumentava-se a tensão de sobrecarga vertical dentro da câmara de calibração, maior foi a força axial para instalar a estaca.

Figura 5.6: Força x Profundidade de instalação da estaca P3.



Fonte: Autor.

Para as estacas P2 (Figura 5.3 e Figura 5.4) e P3 (Figura 5.5 e Figura 5.6) com tensão de sobrecarga vertical de 150 kPa, os valores de torque e força diminuíram durante a instalação conforme a ponta da estaca avança para níveis mais profundos, principalmente para a estaca P3 (maior diâmetro da hélice). No entanto, as medições dos sensores de solo durante a instalação dessas duas estacas abaixo de 150 kPa, mostradas no item 5.2.2.2 as seguir, indicam que os valores das tensões radiais no início da instalação da estaca são comparáveis em três profundidades diferentes (700, 900 e 1000 mm), e, portanto, a ligeira diminuição dos valores de torque e força ao longo da profundidade não é causada pelo possível atrito da parede entre a amostra de areia e o limite do tanque (reduzindo a pressão aplicada em profundidades mais profundas).

Devido à diminuição do torque de instalação ao longo da profundidade, mais pronunciado para estacas helicoidais maiores instaladas com 150 kPa, os valores de torque medidos a aproximadamente 700 mm de profundidade tornaram-se mais próximos para estacas P2 e P3 nas tensões de sobrecarga de 100 e 150 kPa (Figura 5.3 e Figura 5.5), indicando que o ganho no torque resistido pela hélice não é proporcional ao aumento da tensão vertical. Esses resultados podem estar associados à diminuição do ângulo de atrito com o aumento do nível de tensão observado na literatura (Dickin, 1988). O torque de instalação de estacas helicoidais em



areia aumenta com o aumento do coeficiente de pressão passiva de terra  $K_P$  (Ghaly e Hanna, 1991), que aumenta com o ângulo de atrito da areia; portanto, a redução do ângulo de atrito sob maior pressão de confinamento provavelmente ocasionou a diminuição do coeficiente de empuxo passivo e conseqüentemente a redução do torque de instalação para os ensaios de 150 kPa.

Além disso, essa redução de torque mais pronunciada para as estacas P2 e P3, pode ser também consequência dos efeitos da instalação no solo penetrado pela hélice, o que é mais significativo para estacas com hélices de maior diâmetro, conforme examinado posteriormente nesta Tese. As tensões que atuam na hélice durante a rotação da estaca podem ser afetadas por possíveis mudanças na massa cilíndrica do solo acima da hélice (que aumenta com a profundidade da estaca). Sharif et al. (2019) simularam a instalação de estacas helicoidais em areia densa usando o Método dos Elementos Discretos (DEM), calibrados com resultados de testes de centrifugação, e observaram que após a instalação a densidade relativa inicial do solo ao redor da estaca muda de 80% para 55%. No entanto, mais experimentos de campo e modelo são necessários para confirmar esses efeitos mencionados acima no torque de instalação.

A Tabela 5.1 resume os resultados de instalação dos ensaios T1 a T9. Nesta tabela  $T_h$  é o torque resistido na hélice durante a instalação e  $V_h$  é a força axial vertical medida logo acima da hélice durante a instalação. São apresentados nesta tabela os valores registrados no momento da pausa da instalação (em torno de 700 mm de profundidade) e os valores médios do trecho em o valor inicial de pico e o momento da pausa. Os resultados desta tabela são discutidos no item 5.4.2.3 neste capítulo.

Tabela 5.1: Resultados de instalação das estacas nos ensaios T1 a T9

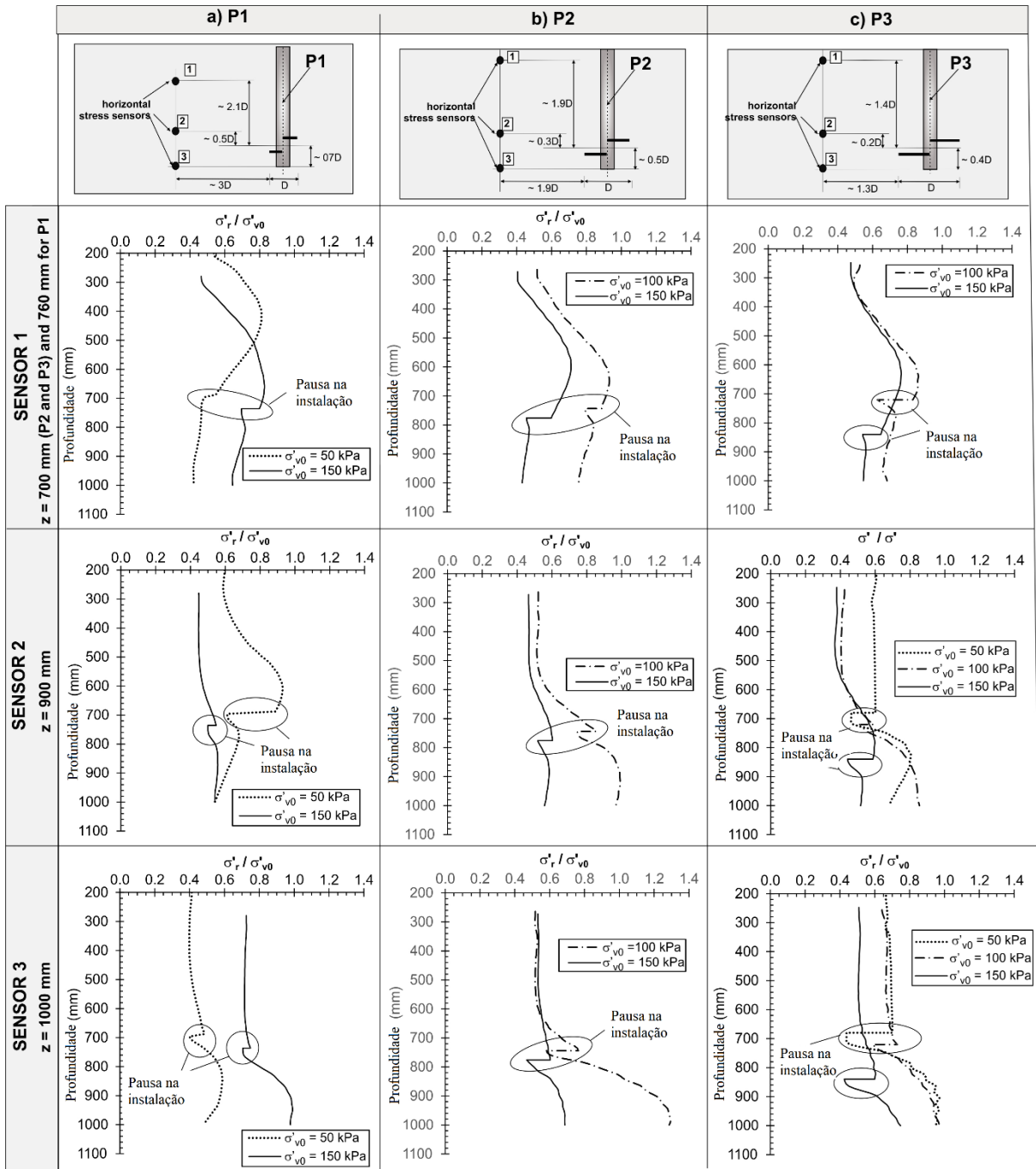
Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	$T_{h\text{-pausa}}$ N.m	$T_{h\text{-medio}}$ N.m	$V_{h\text{-pausa}}$ (kN)	$V_{h\text{-medo}}$ (kN)	$V_{h\text{-medio}} / T_{\text{medio}}$ ( $m^{-1}$ )	$V_{h\text{-medio}} \cdot D / T_{h\text{-medio}}$
T1	50		53.4	49.2	-	2.9*	59.0	5.0
T2	100	P1	111.7	117.9	6.12	6.76	57.3	4.9
T3	150		185.6	184.2	9.74	9.60	52.1	4.4
T4	50		65.5	68.6	-	-	-	-
T5	100	P2	181.4	170.2	12.8	12.1	71.0	9.0
T6	150		180.8	220.6	10.8	12.7	57.6	7.3
T7	50		-	-	3.96	3.96	-	-
T8	100	P3	310.0	322.9	5.82	5.92	18.3	3.1
T9	150		337.3	382.5	9.34	10.74	28.1	4.8

\*Considerando o valor médio de alguns dados após o pico e de alguns valores registrados após a pausa na profundidade de 622mm (ver figura 5.2)

#### 5.2.2.2 Resultados medidos no solo na instalação

Os resultados da tensão radial durante a instalação das estacas dos testes T2 e T4 (P1 sob 100 kPa e P2 sob 50 kPa) não são confiáveis (provavelmente devido a possíveis problemas no cabo do sensor ou posicionamento do sensor) e, portanto, foram descartados do estudo. Portanto, para a verificação da condição  $K_0$  inicial dos experimentos atuais, e para avaliar o efeito da instalação das estacas no solo penetrado, os resultados dos outros sete ensaios são apresentados na Figura 5.7. Esta figura ilustra a razão entre a tensão radial ( $\sigma'_r$ ) e a sobrecarga vertical ( $\sigma'_{v0}$ ) durante a instalação da estaca em diferentes posições no solo, e mostra que os valores da razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  registrados antes da estaca a instalação varia de aproximadamente 0,4 a 0,6, indicando resultados razoáveis do  $K_0$  para areia compacta seca.

Figura 5.7: Variação das tensões radiais durante instalações das estacas 01, 02 e 03 sob sobrecarga vertical de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa.



Fonte: Autor.

Em geral, os resultados da Figura 5.7 indicam que durante a instalação da estaca: (a) a razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  aumentou para um valor máximo conforme a estaca se aproximou da posição do sensor, e após este momento diminuiu gradualmente para um valor tendendo ao coeficiente de empuxo lateral em repouso; (b) mudanças na tensão radial foram observadas em distâncias radiais menores que 3D (D = diâmetro da hélice) da borda da hélice, e em distâncias verticais

menores que  $2,1D$  acima da hélice, ilustrando a zona de solo afetada pela instalação das estacas; e (c) para uma estaca de modelo particular, a taxa de aumento da razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  foi geralmente mais importante para os casos sob sobretaxa vertical mais baixa. Esta última observação pode ser explicada pela diminuição do ângulo de atrito com o aumento do nível de tensão, influenciando o coeficiente de empuxo lateral passiva conforme mencionado anteriormente no texto.

Outras observações verificadas na Figura 5.7:

- 1) Na instalação da estaca de maior diâmetro, a borda da hélice passou mais próxima dos sensores durante a instalação, no entanto os resultados nos sensores, por serem instalados relativamente distantes da estaca, não foram sensíveis a esta pequena mudança de raio da hélice de 64 mm (estaca 02) para 85mm (estaca 03)
- 2) No momento da pausa a instalação houve redução das tensões radiais em todos os casos observados.
- 3) Pela leituras em todos os sensores, observa-se que os valores de tensão radial aumentam quando a hélice da estaca passa por sua profundidade.
- 4) Pelas leituras no sensor 1, a 700 mm de profundidade em relação ao topo, e 300 mm acima da cota final de instalação da estaca, nota-se que após a passagem da hélice nesta profundidade as tensões radiais tendem a retornar ao valor inicial.
- 5) Pelas leituras no sensor 2 (900 mm de profundidade), instalados em profundidade um pouco acima da profundidade final da hélice, nota-se que após a passagem da hélice nesta profundidade as tensões radiais reduzem um pouco, mas não chegam aos valores iniciais, como na profundidade de 700 mm (sensor 1).
- 6) Pelas leituras no sensor 3 (1000 mm de profundidade), instalados na profundidade da ponta da estaca, nota-se que as tensões radiais aumentam conforme a hélice se aproxima desta profundidade.

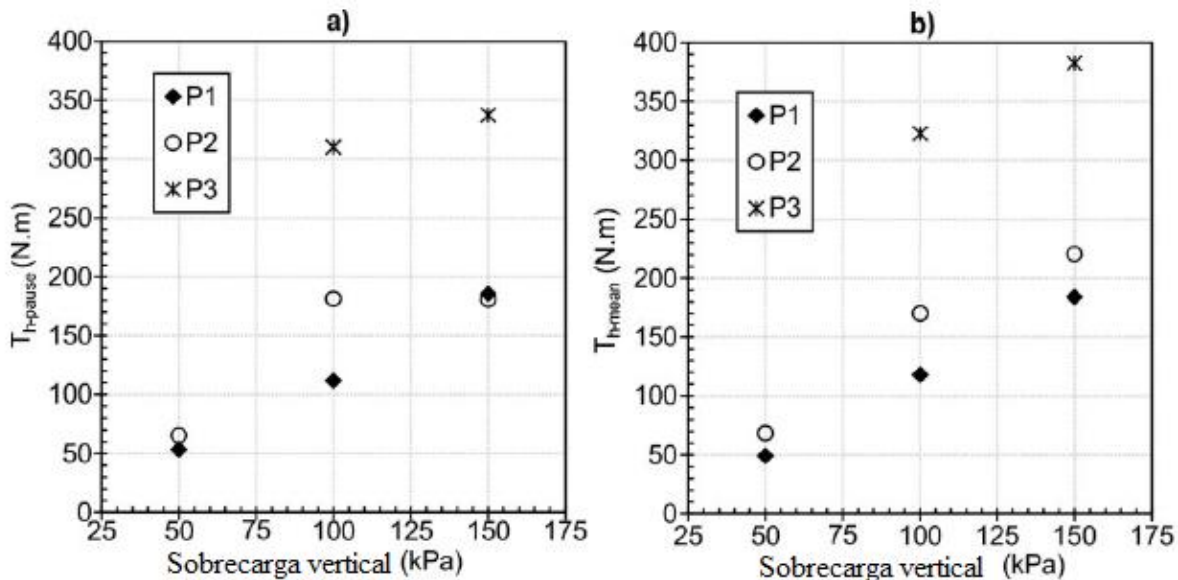
#### 5.2.2.3 Análise dos resultados de instalação

Nesta tese, foram estudados os seguintes objetivos: (1) avaliar o efeito das tensões de sobrecarga (profundidade) no torque resistido pela hélice durante a instalação. Por esta razão que se instalou a instrumentação para medir o torque logo acima da hélice da estaca modelo; (2) Verificar o efeito das tensões de sobrecarga na força vertical de instalação (necessária para

manter o avanço da estaca no solo igual a um passo por volta); e (3) Avaliar o efeito do aumento de área da hélice no torque e na força vertical de instalação.

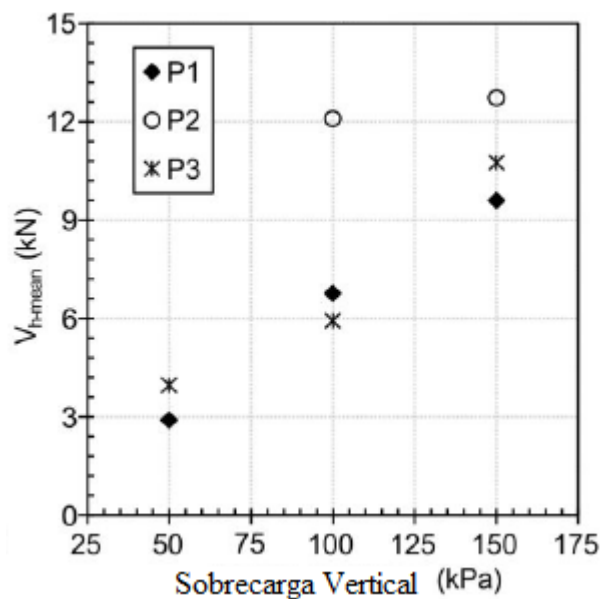
As Figura 5.8 e Figura 5.9 ilustram o efeito da sobrecarga no torque e na força vertical de instalação medidos logo acima da hélice pela instrumentação. Vale ressaltar que estes resultados da pesquisa são relativos apenas a parcela da hélice da estaca (individualmente), e não está sendo analisado o efeito da resistência por atrito na haste (fuste) no torque e na força vertical. A Figura 5.8b ilustra que para as três estacas testadas os valores da média  $T_h$  aumenta quase linearmente com o aumento da sobrecarga vertical. Em contraste, a Figura 5.8a mostra que a taxa de aumento da pausa  $T_h$  com a sobrecarga vertical tornou-se menos importante após 100 kPa para estacas com hélice maior (P2 e P3), devido à redução do torque de instalação ao longo da profundidade observada para o testes de 150 kPa, conforme discutido anteriormente. Figura 5.9 indica que os valores de  $V_{h-média}$  tendem a aumentar linearmente com a sobrecarga vertical, porém apenas o valor médio de  $V_h$  obtido durante a instalação da estaca P2 abaixo de 100 kPa não segue a tendência geral (provavelmente devido a algum problema de instalação).

Figura 5.8: Efeito da sobrecarga vertical no torque de instalação da hélice.



Fonte: Autor.

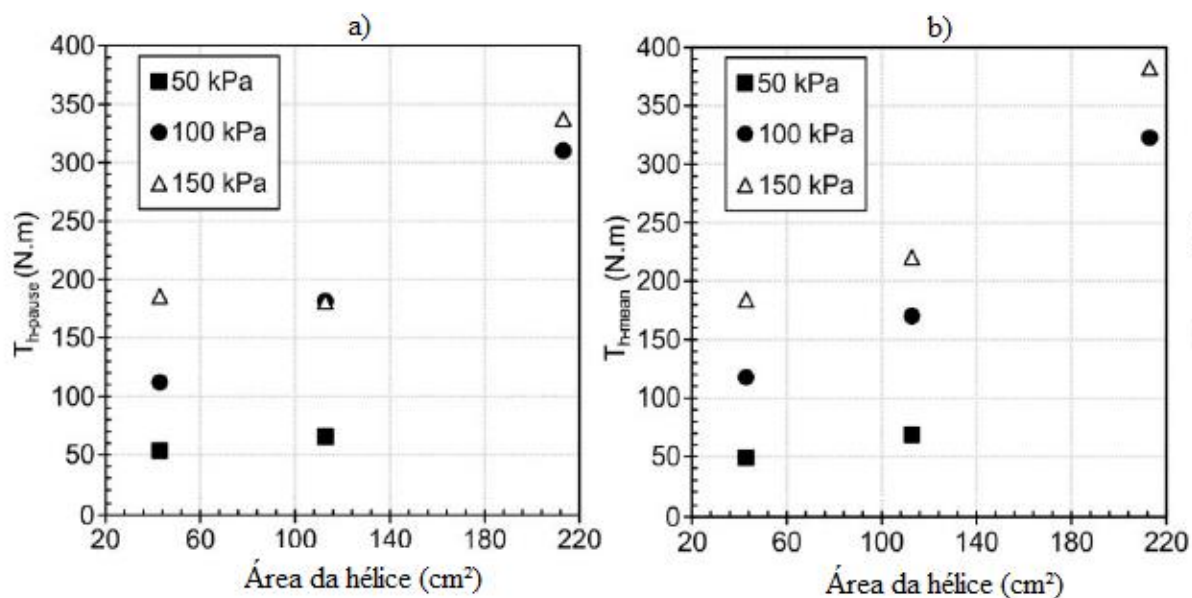
Figura 5.9: Efeito da sobrecarga vertical no força vertical de instalação da hélice ( $V_{h\text{-medio}}$ ).



Fonte: Autor.

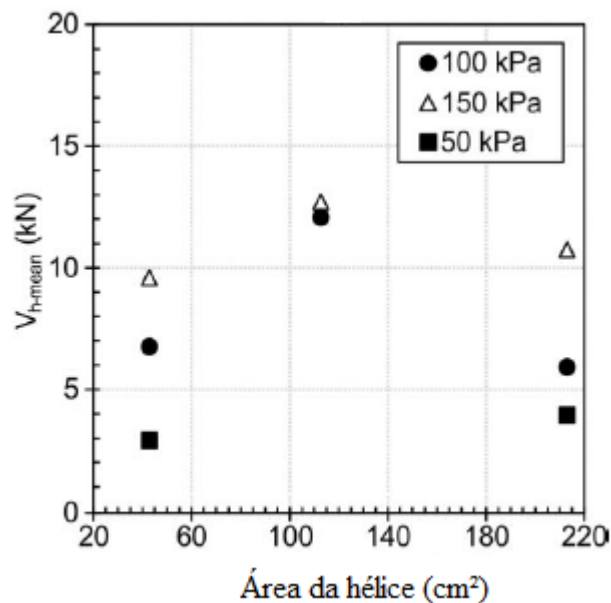
As Figura 5.10 e Figura 5.11 ilustram o efeito do aumento da área da hélice no torque e na força vertical de instalação, medidos logo acima da hélice pela instrumentação.

Figura 5.10: Efeito da área da hélice no torque de instalação da hélice.



Fonte: Autor.

Figura 5.11: Efeito da área da hélice na força vertical de instalação da hélice ( $V_{h\text{-medio}}$ ).



Fonte: Autor.

A Figura 5.10 mostra que o torque de instalação tende a aumentar com o aumento da área projetada da hélice, provavelmente devido ao aumento da área de contato da hélice durante a instalação. No entanto, a relação passo/diâmetro da hélice (relação  $p/D$ ) é outro fator importante que deve ser levado em consideração para a interpretação dessas figuras. Para o estudo atual, a relação  $p/D$  (ou ângulo da hélice) da estaca P1 é muito maior em comparação com as estacas P2 e P3 (Tabela 5.2). Conforme observado por Ghaly e Hanna (1991), o torque de instalação aumenta com a relação  $p/D$  porque uma área de superfície maior da hélice está sujeita à resistência da areia durante a instalação. No entanto, esses autores também observaram que, embora seja necessário maior torque para instalar estacas helicoidais com maior relação  $p/D$ , a carga final de tração é levemente afetada por essa relação. Portanto, os valores de torque obtidos para a estaca P1 (casos de área da hélice inferior nas Figura 5.10 e Figura 5.11) são influenciados (aumentados) pelo maior ângulo da hélice.

As medidas de força mostram que a dimensão da hélice (para a faixa testada) não parece influenciar a força de instalação vertical das estacas helicoidais. A Figura 5.11 indica que para uma condição de sobrecarga vertical particular, os valores de  $V_h$  são de magnitude semelhante para a faixa de área da hélice estudada (excluindo a medição obtida para a estaca P2 - 100 kPa). Esse fato sugere que a força de instalação (conhecida como “*crowd force*”) de estacas helicoidais parece ser mais influenciada pela tensão vertical no perfil do solo do que pela área da hélice. No entanto, mais experimentos são necessários para confirmar esta observação.

Tabela 5.2: Razão da hélice e do passo com o diâmetro do fuste

Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	Diâmetro do fuste (mm)	Razão da hélice D/d	Razão passo/D p/D
T1	50				
T2	100	P1	42	2	0.47
T3	150				
T4	50				
T5	100	P2	42	3	0.31
T6	150				
T7	50				
T8	100	P3	42	4	0.24
T9	150				

Fonte: Autor

Byrne e Houlsby (2015) sugeriram que as relações entre o torque aplicado e a carga aplicada poderiam ser estabelecidas para instalações de estacas helicoidais de forma semelhante às aquelas desenvolvidas para outros tipos de fundações. Com base nessa recomendação, a Tabela 5.1 apresenta os resultados da razão  $V_{h-média} / T_{h-média}$ , e esses valores multiplicados pelo diâmetro da hélice ( $V_{h-média.D} / T_{h-média}$ ), que é adimensional. Os valores da relação  $V_h / T_h$  são semelhantes para as estacas P1 e P2 (excluindo o teste T5), e significativamente menores para o caso da estaca P3 (maior razão de hélice). Isso ocorreu provavelmente porque o ganho de torque de instalação com o aumento da área da hélice é importante, embora não tenha efeito sobre a força vertical, e como consequência a relação  $V_h / T_h$  deve ser reduzida para casos de maior razão de hélice. Além disso, nenhum efeito da sobretaxa vertical foi observado nos resultados da razão  $V_h / T_h$ , provavelmente porque tanto a média  $T_h$  quanto a  $V_h$  aumentam com o aumento da sobretaxa vertical.

Os valores da relação de instalação adimensional mostrados na Tabela 5.1 variam entre 3,1 e 5,0 para as estacas P1 e P3, e é maior para a estaca P2. Os poucos resultados também indicam que essa relação adimensional parece ser independente da sobrecarga vertical. Para um modelo de estaca helicoidal em areia instalado em centrífuga por Davidson et al. (2018), a relação de instalação adimensional foi de 4,6, dentro da faixa dos valores encontrados no trabalho atual. Infelizmente, a força axial não é medida durante a instalação de estacas helicoidais para comparar os resultados de campo com os valores da relação de instalação adimensional encontrada na Tese.



A única citação de valores de força vertical durante a instalação medidos na prática deste tipo de estaca é o comentário de Perko (2000), em que diz que valores de forças descendentes durante a instalação de estacas de hélice única e dupla, com diâmetro de 152 mm, variaram de 4,5 a 17,8 kN. Na presente pesquisa os valores de  $V_h$  encontrados para instalar as estacas P2 e P3 (hélices de diâmetros 127 e 170mm), com diâmetro de hélice próximos ao valor de Perko (2000), variaram de 4 a 13 kN. Portanto estes valores obtidos na câmara de calibração estão dentro da faixa encontrada em campo, o que valida o uso desta técnica experimental para investigar as forças de instalação de estacas helicoidais.

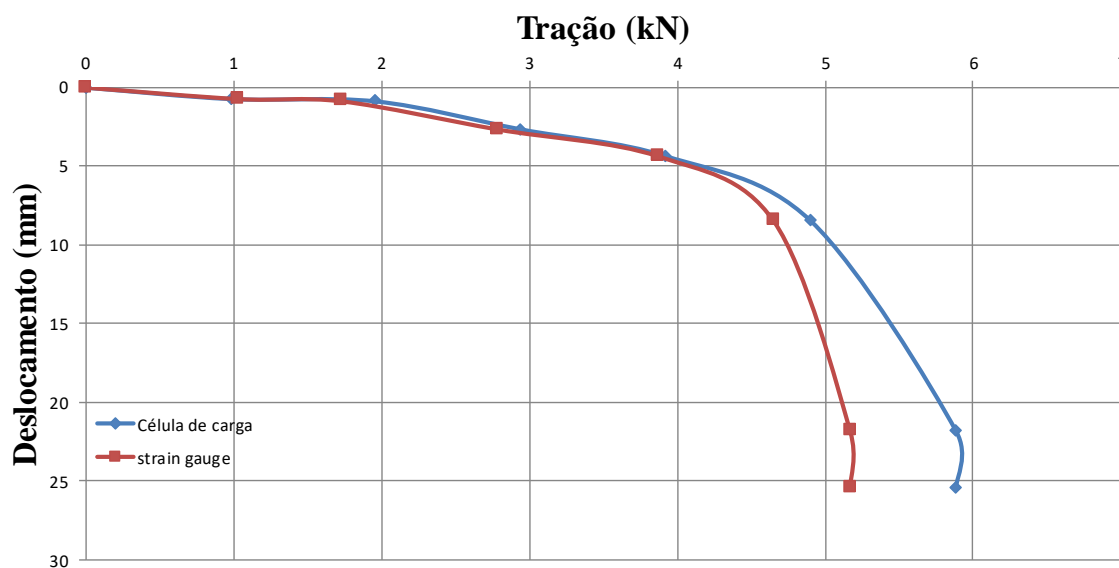
Por fim, compreender estes dois efeitos (profundidade e aumento de área da hélice) na instalação da estaca é uma importante contribuição para o conhecimento atual sobre as forças de instalação deste tipo de fundação, que tem sido investigadas para aplicação de seu uso em obras *offshore*.

### 5.2.3 Ensaio de tração

#### 5.2.3.1 Resultados medidos nas estacas nos ensaios de tração

As Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14 mostram os resultados dos ensaios de tração na estaca modelo P1 (menor hélice) para as tensões de sobrecarga de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente. Nelas é possível verificar a diferença entre a carga de tração medida pela célula de carga na cabeça da estaca, e a medida logo acima da hélice, por meio da instrumentação (*strain-gauge*), feita para separar a parcela resistida por atrito no pequeno comprimento de fuste da estaca modelo, já que o objetivo da pesquisa era obter a parcela da capacidade de carga a tração devido a contribuição da hélice ( $Q_{h-T}$ ).

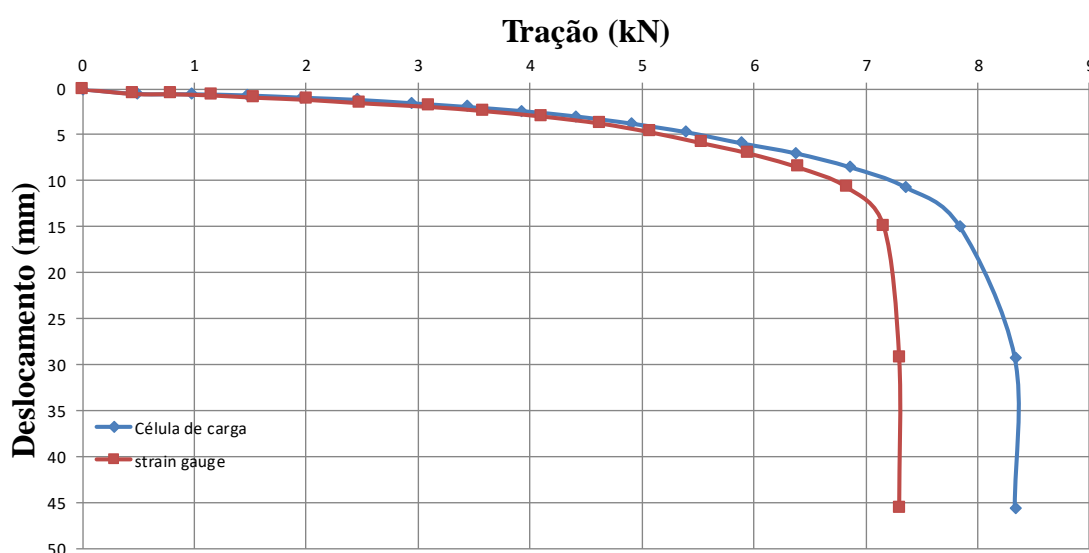
Figura 5.12: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 50 kPa.



Fonte: Autor.

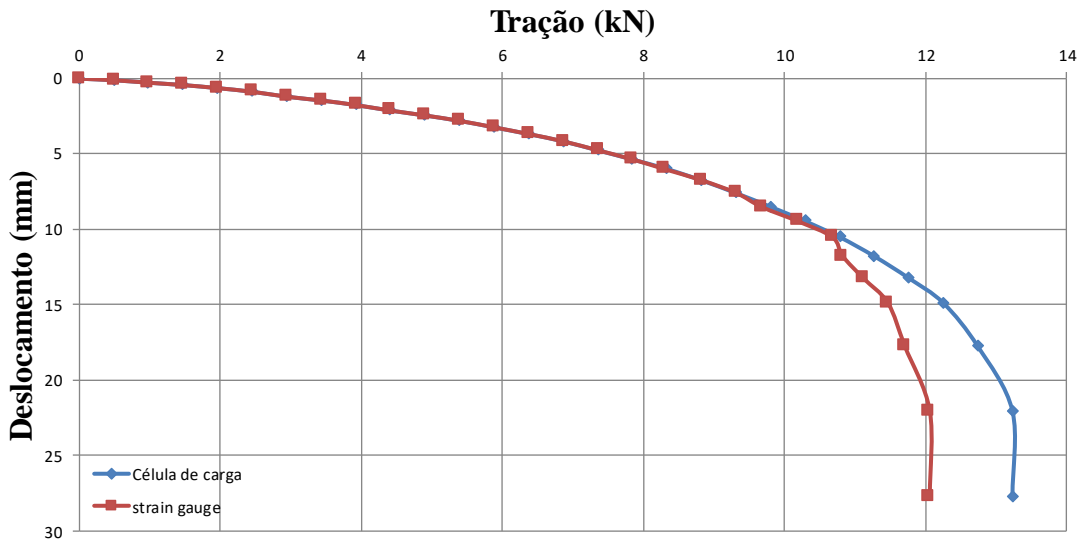
As Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14 mostram que conforme se aproximava da ruptura no ensaio, a carga axial de tração medida pelo “*strain gauge*” se “afastava” da leitura feita pela célula de carga, esta diferença foi resistida por atrito lateral na haste da estaca. Em todos os ensaios apresentados, observa-se que a estaca atingiu a carga de ruptura.

Figura 5.13: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 100 kPa.



Fonte: Autor.

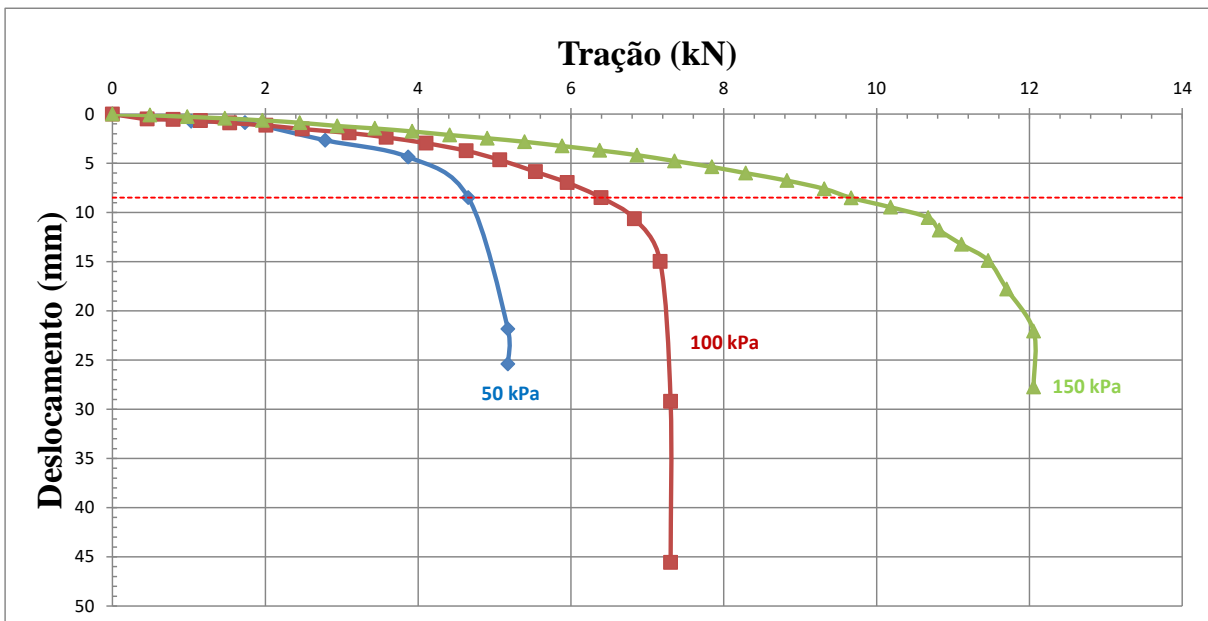
Figura 5.14: Carga de tração x deslocamento da estaca P1 com sobrecarga vertical de 150 kPa.



Fonte: Autor.

A Figura 5.15 compara as curvas de carga de tração resistida pela hélice x deslocamento vertical, sob diferentes condições de sobrecarga vertical nos ensaios na estaca P1. Esta figura ilustra o efeito do confinamento na capacidade de carga a tração da hélice ( $Q_{h-T}$ ). Quanto maior a sobrecarga vertical, maior foi o valor de  $Q_{h-T}$ .

Figura 5.15: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P1, com diferentes sobrecargas verticais.

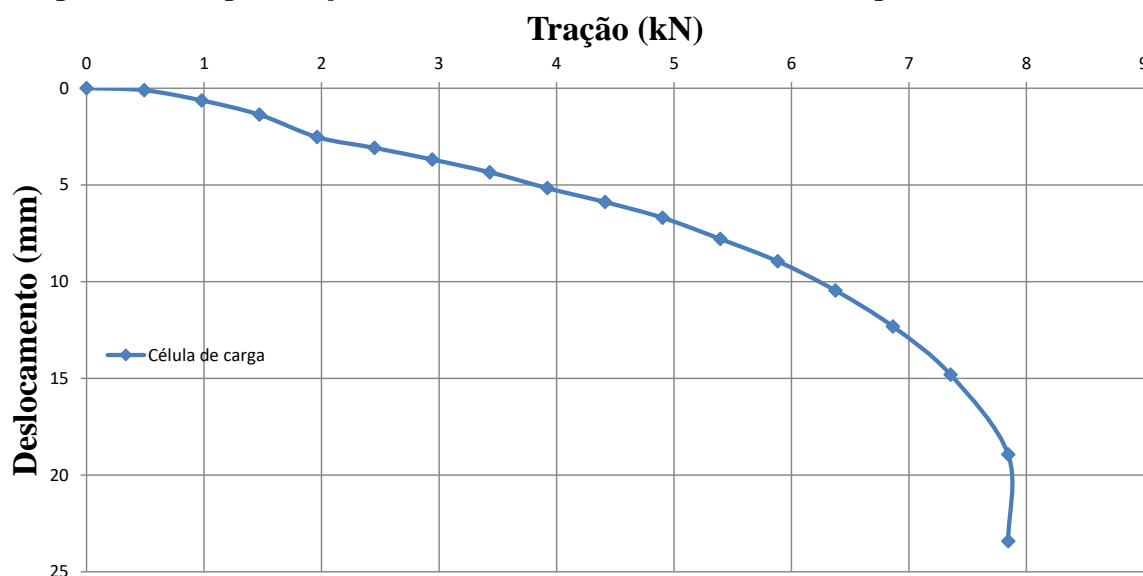


Fonte: Autor.

A Figura 5.15 ilustra também que quanto menor a tensão de sobrecarga, a estaca (de mesmo diâmetro de hélice) atinge a ruptura antes (com menor deslocamento). Este fato indica que pelo critério de ruptura normalmente utilizado para estacas helicoidais, que assume que a carga de ruptura é equivalente ao deslocamento de 10% do diâmetro da hélice (ilustrado na linha pontilhada vermelha na Figura 5.15), pode-se obter resultados de carga de ruptura encontradas em diferentes trechos da curva-carga-deslocamento (mais próximo da carga máxima [ruptura física], no caso de menor confinamento, e mais distante desta, no caso de maiores confinamentos). Foi plotado na Figura 5.15 o critério do deslocamento de 10% do diâmetro da hélice apenas para fins comparativos do item 5.2.5, onde será comparado com a compressão, pois, na compressão não houve ruptura nítida e utilizou-se deste mesmo critério.

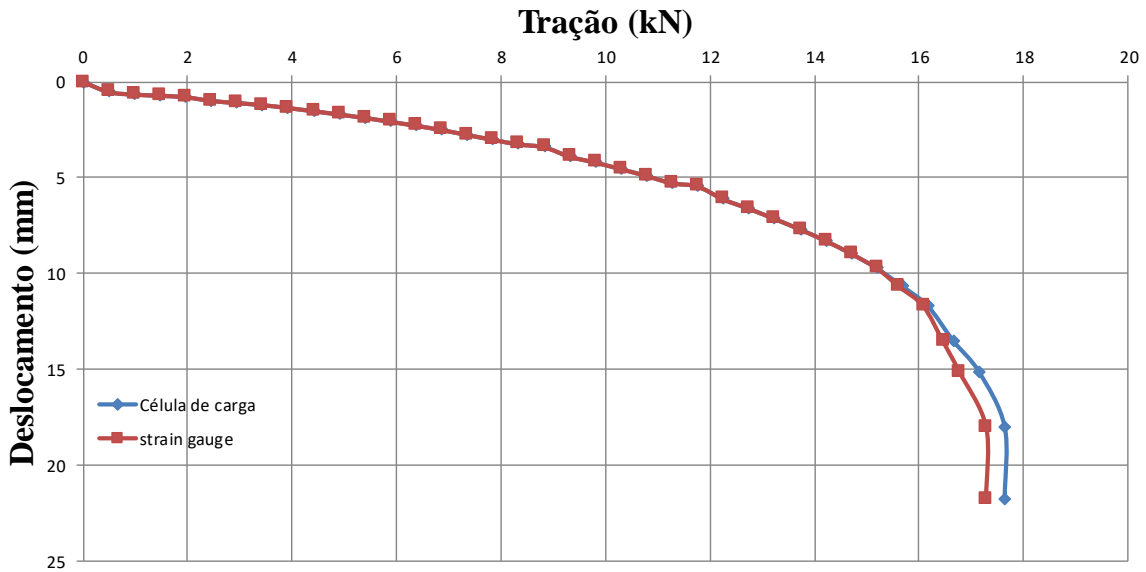
As Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 mostram os resultados da carga de tração x deslocamento da estaca P2 para as tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente. Infelizmente, para a tensão de sobrecarga vertical de 50 kPa, o “*strain gauge*” parou de funcionar durante a instalação da estaca.

Figura 5.16: Carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 50 kPa.



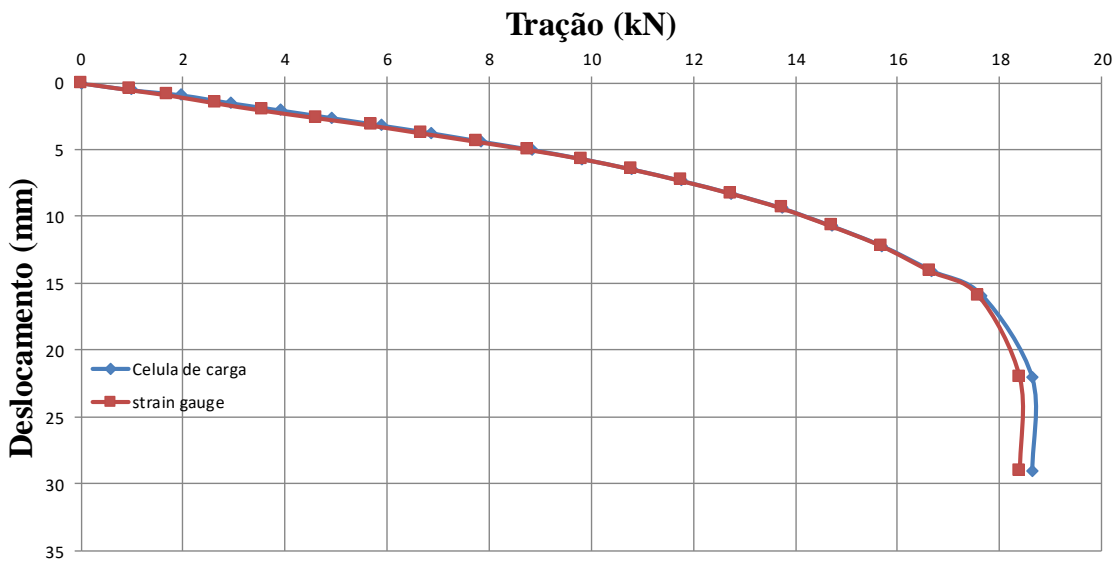
Fonte: Autor.

Figura 5.17: carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 100 kPa.



Fonte: Autor.

Figura 5.18: Carga de tração x deslocamento da estaca P2 com sobrecarga vertical de 150 kPa.



Fonte: Autor.

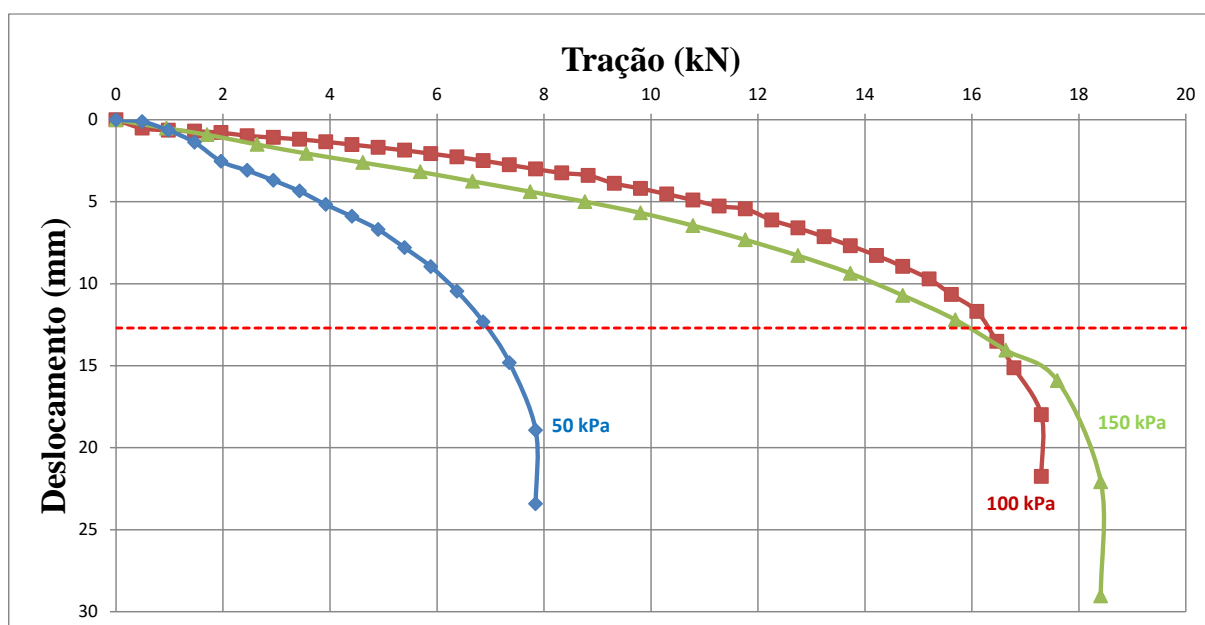
Nas Figura 5.17 e Figura 5.18, conforme se aproximava da ruptura, a tração medida pelo “*strain gauge*” se “afastava” da leitura feita pela célula de carga, esta diferença era suportado pelo haste da estaca (atrito lateral).

No entanto, vale ressaltar que nesta estaca P2, a resistência de atrito na haste foi menor do que na estaca P1, por ser ligeiramente maior. Este fato ocorre devido ao efeito de “sombra” da hélice durante o carregamento, que atinge um maior comprimento na parcela de haste acima da hélice maior.

Devido ao efeito de sombra, durante o carregamento a tração numa zona acima da hélice não é mobilizado atrito na haste. Por causa deste efeito de sombra, Rao *et al.* (1993) sugere que o trecho de haste acima da hélice igual a  $2D$  (2 vezes o diâmetro da hélice) não deve ser considerado no cálculo da resistência por atrito lateral na haste.

A Figura 5.19 compara as curvas de carga de tração resistida pela hélice x deslocamento vertical, sob diferentes condições de sobrecarga vertical nos ensaios na estaca P2. Esta figura ilustra o efeito da profundidade na capacidade de carga a tração da hélice ( $Q_{h-T}$ ). Quanto maior a sobrecarga vertical, maior foi o valor de  $Q_{h-T}$ .

Figura 5.19: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P2, com diferentes sobrecargas verticais

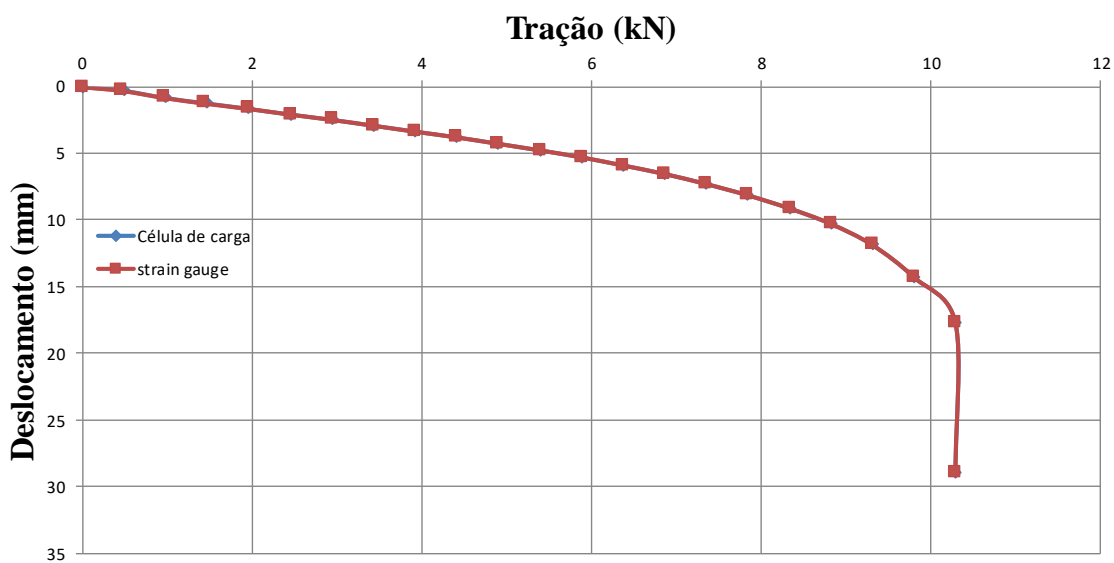


Fonte: Autor.

No entanto, nota-se na Figura 5.19 que nos ensaios com 100 kPa e 150 kPa a diferença na carga de ruptura não foi significativa, e o comportamento das duas curvas é similar. Visto que aumento de confinamento implica em aumento de profundidade, esta pequena diferença pode estar associada ao conhecido efeito de “profundidade crítica” na literatura de fundações por estacas. Segundo Randolph (2003), historicamente os projetos de fundações por estacas em areia são baseados em simples relações lineares para resistência por atrito e resistência de ponta, mas com valores limitados em alguma “profundidade crítica”, devido a observações experimentais de que comprimentos crescentes de estacas na areia não produzem aumentos proporcionais na capacidade.

As Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22 mostram os resultados da carga de tração x deslocamento da estaca P3 para as tensões de sobrecarga vertical de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente. Nestas figuras nota-se que a diferença entre a carga de tração aplicada pela célula de carga e a medida acima da hélice foi menor do nos ensaios na estaca P1, devido ao efeito de “sombra” da hélice na resistência por atrito na haste durante o carregamento, discutido anteriormente neste item. No caso do ensaio com sobrecarga vertical de 50 kPa, a resistência por atrito na haste foi praticamente inexistente.

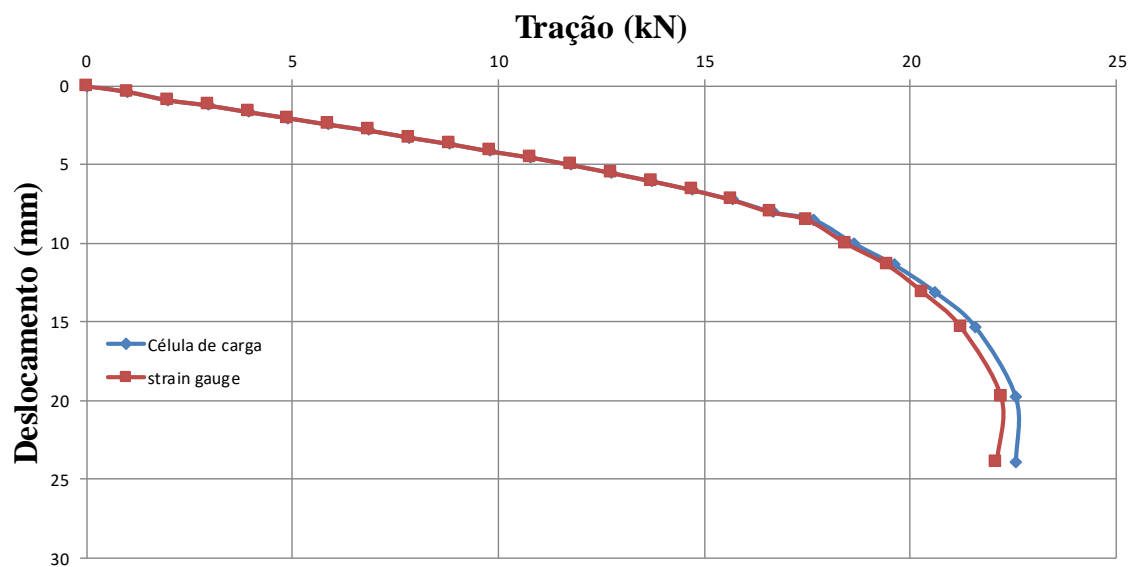
Figura 5.20: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 50 kPa.



Fonte: Autor.

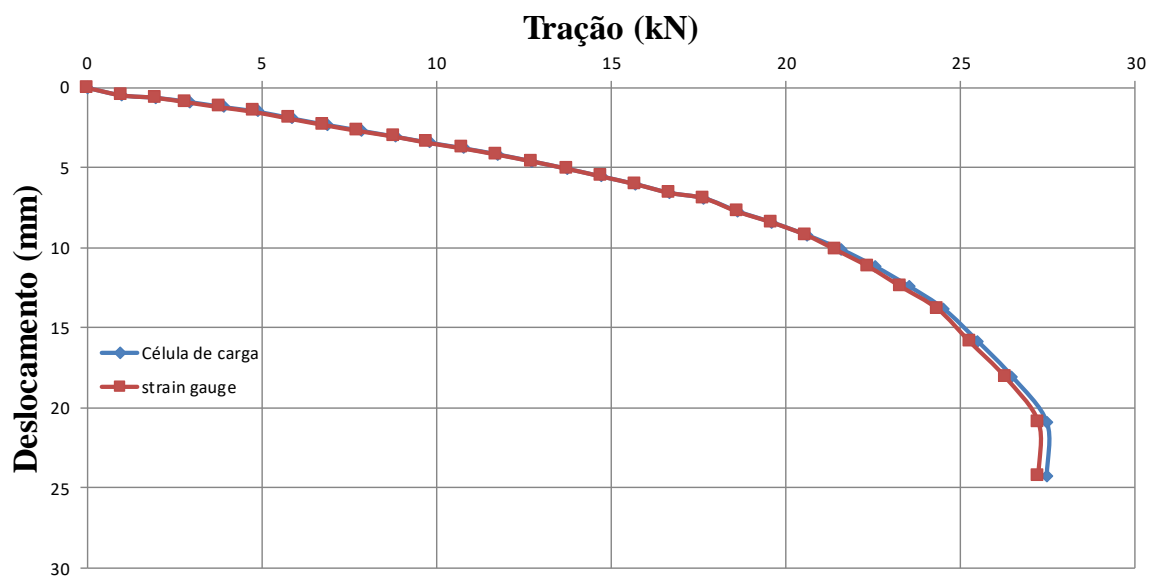
A Figura 5.23 compara as curvas de carga de tração resistida pela hélice x deslocamento vertical, sob diferentes condições de sobrecarga vertical nos ensaios na estaca P3. Esta figura ilustra o efeito do confinamento na capacidade de carga a tração da hélice ( $Q_{h-T}$ ). Quanto maior a sobrecarga vertical, maior foi o valor de  $Q_{h-T}$ . No entanto, como observado para a estaca P2, a diferença de comportamento entre 100 e 150 kPa é menor comparado a diferença entre 50 e 100 kPa. Provavelmente isto ocorreu pela mesma razão discutida anteriormente para os resultados da estaca P2 (profundidade crítica).

Figura 5.21: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 100 kPa.



Fonte: Autor.

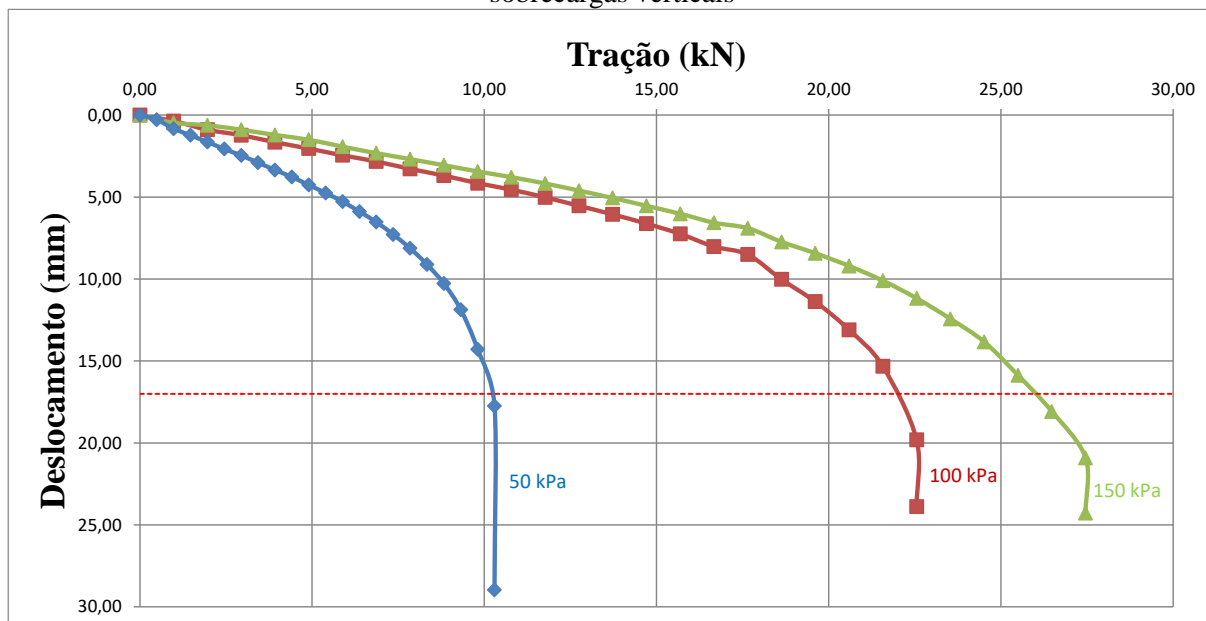
Figura 5.22: Carga de tração x deslocamento da estaca P3 com sobrecarga vertical de 150 kPa.



Fonte: Autor.



Figura 5.23: Carga de tração resistida pela hélice x deslocamento da estaca P3, com diferentes sobrecargas verticais



Fonte: Autor.

A ruptura por mergulho é observada em todos os testes de tração. Testes de campo em estacas de hélice simples em areia muito densa, realizados em Sakr (2009) e em Gavin et al. (2014) mostraram que a capacidade de levantamento das estacas de hélice simples é de aproximadamente 50% da capacidade de compressão. Essa diferença é causada pelos efeitos da instalação no solo acima da hélice. Conforme mencionado anteriormente, Sharif et al. (2019) observaram que após a instalação de estaca helicoidal, a compacidade relativa inicial da areia acima da hélice muda de 80% para 55%. Portanto, como a capacidade à tração das estacas helicoidais é controlada pelo solo acima da hélice, as curvas da Figura 5.15, Figura 5.19 e Figura 5.23 não representam o caso de areia muito compacta.

Para os três tipos de estacas estudados (P1, P2 e P3), as Figura 5.15, Figura 5.19 e Figura 5.23 mostram que para os ensaios sob menor tensão vertical, a estaca atinge o ponto de ruptura em menores deslocamentos. Este fato indica que o critério de ruptura de 0.1D, normalmente usados para estacas helicoidais, pode fornecer resultados de capacidade de carga à tração relacionados a diferentes fases da curva carga-deslocamento (mais perto do pico de carga para estacas sob menor tensão de confinamento e mais distante do pico carga, no caso de maior tensão de confinamento).

Ao analisar a Figura 5.19 e Figura 5.23, as estacas com hélice maior (P2 e P3) as curvas obtidas durante os testes de carregamento de 100 e 150 kPa são próximas umas das outras. A Figura 5.3 e Figura 5.5 também indica que para as estacas P2 e P3, o torque de instalação de 100 e 150 kPa tende a se aproximar no final da primeira fase de instalação. Portanto, como a

capacidade de carga a tração é proporcional ao torque final da instalação (Hoyt e Clemence 1989), se os valores de torque finais estão próximos, os valores da capacidade de carga à tração hélice também devem estar próximos. Esses resultados próximos indicam que o ganho no torque final e na tensão de tração final mobilizado na hélice com o aumento da tensão vertical tornou-se menos importante para valores de tensão vertical mais elevados. Este fato pode estar associado ao conhecido efeito da profundidade crítica sobre a resistência da base da estaca, que ocorre devido à diminuição do ângulo de atrito com o aumento do nível de tensões, observado na literatura. Para considerar este efeito, Perko (2009) propôs o uso de uma profundidade crítica para a estimativa da capacidade compressiva de estacas helicoidais. Além disso, para a faixa de tensão dos testes de tração em ancoragem em areia por Dickin (1988) em centrífuga, a resistência ao cisalhamento aumentou significativamente com a diminuição da tensão de confinamento.

A Figura 5.15 mostra que o efeito da tensão de sobrecarga vertical, observado para as estacas P2 e P3, não é perceptível para a estaca P1, provavelmente porque neste caso a hélice é muito menor em relação às demais estacas. No entanto, mais testes são necessários para verificar o efeito da tensão de confinamento na capacidade de carga à tração da hélice de estacas helicoidais em areia observada na investigação atual.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados de capacidade de carga resistida pela hélice na tração ( $Q_{h-T}$ ) nas estacas modelo desta pesquisa. Nesta tabela são mostrados os valores relativos a carga máxima,  $Q_{h-T(\text{pico})}$ , e os valores relativos ao deslocamento da estaca igual  $10\%D$ ,  $Q_{h-T(0.1D)}$ , que é um critério de ruptura usados frequentemente para este tipo de estaca. Também são mostrados os valores em forma de tensão de ruptura da hélice na tração ( $q_{h-T}$ ).

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de tração

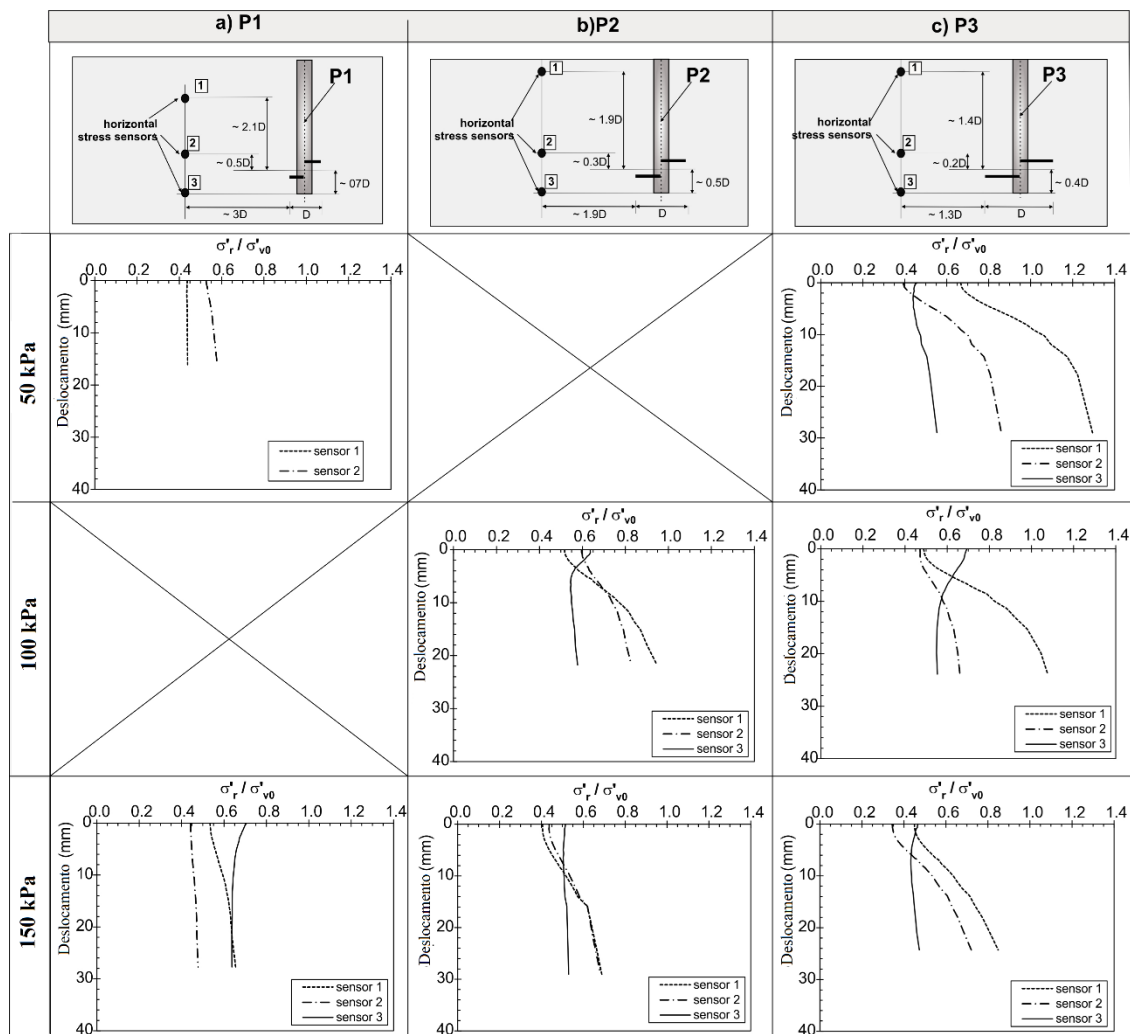
Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	$Q_{h-T(\text{pico})}$ (KN)	$Q_{h-T(0.1D)}$ (KN)	$q_{h-T(\text{pico})}$ (KPa)	$q_{h-T(0.1D)}$ (KPa)
T1	50		2.9	2.6	676	600
T2	100	P1	7.3	6.4	1693	1482
T3	150		12.0	9.6	2793	2240
T4	50		7.9	6.9	700	612
T5	100	P2	17.6	16.5	1560	1462
T6	150		18.6	15.8	1649	1400
T7	50		10.3	10.1	483	474
T8	100	P3	22.4	21.8	1051	1023
T9	150		27.5	26	1290	1220

Fonte: Autor

### 5.2.3.2 Resultados medidos no solo nos ensaios de tração

A Figura 5.24 mostra os resultados da razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  no solo durante os testes de tração (exceto para os testes T2 e T4). As tensões iniciais no solo na Figura 5.24 estão levemente menores do que os valores medidos no final da instalação (Figura 5.7). Os ensaios de tração não foram feitos logo em seguida da instalação, foram feitos no dia seguinte. Durante a noite, após a instalação da estaca, a pressão na membrana era desligada e religada no dia seguinte (o compressor era desligado por questões de segurança). Para realizar os ensaios de tração esperava-se a estabilização das tensões no solo, registradas pelos sensores de pressão posicionados no solo.

Figura 5.24: Variação das tensões radiais durante os ensaios de tração nas estacas P1, P2 e P3 sob sobrecarga vertical de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa.



Fonte: Autor.

As principais observações obtidas dos sensores de solo durante os testes de tração são: (a) as tensões radiais na areia a uma distância vertical de  $1,4D$  a  $1,9D$  acima do nível da hélice e a uma distância radial de  $1,3D$  a  $1,9D$  da borda da hélice (sensor 1), aumentou consideravelmente durante os testes de levantamento (Figura 5.24b, c); (b) em geral as tensões radiais no nível logo abaixo da hélice (sensor 3) diminuíram quando a estaca foi “arrancada” devido ao movimento dos grãos de areia em direção à cavidade formada abaixo da hélice (após o deslocamento da estaca para cima); (c) a variação da tensão radial no solo medida para os ensaios na estaca P1 (Figura 5.24a) é quase insignificante, provavelmente porque os sensores estão instalados a uma distância radial de  $3,0D$  da borda da hélice; (d) o aumento da razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  medido pelos sensores 1 e 2 (posicionados acima do nível da hélice) é mais pronunciado para os testes na estaca com maior hélice (P3), pois para essas estacas a distância entre os

sensores e a borda da hélice é inferior. Esta última observação indica que a razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  durante a tração da estaca é maior em posições de solo mais próximas da borda da hélice.

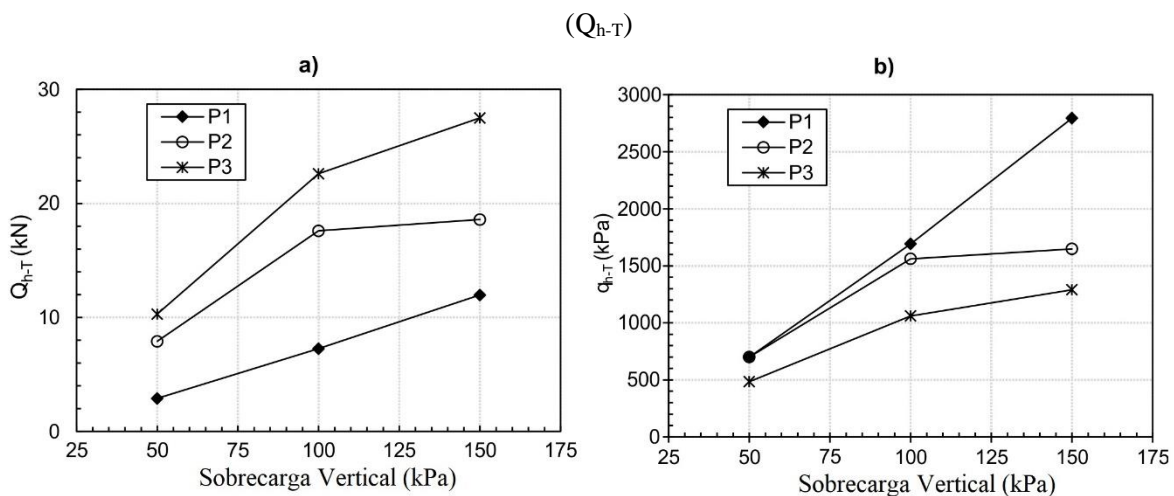
As medições dos sensores de solo durante a instalação da estaca P3 (hélice maior), mostradas na Figura 5.24c, indicam que para os testes de tração sob menor tensão vertical o aumento da razão  $\sigma'_r / \sigma'_{v0}$  nas posições do solo acima da hélice (sensores 1 e 2) é mais importante em comparação com o teste sob maior tensão vertical. Conforme mencionado anteriormente no texto, este fato ocorreu provavelmente devido à diminuição do ângulo de atrito com o aumento do nível de tensão.

Como mostra a Figura 5.24, os sensores foram posicionados horizontalmente relativamente distantes da projeção da borda da hélice (1,9D e 1,3D). Como mostra os resultados da simulação numérica de ensaio de tração na Figura 4.8, os maiores deslocamentos horizontais ocorrem na zona próxima a superfície cilíndrica formada pela projeção da hélice. Nesta pesquisa os sensores foram instalados mais distantes desta zona para que não influenciassem os resultados de capacidade de carga e não fossem danificados na instalação da estaca.

### 5.2.3.3 Análise dos resultados dos ensaios de tração

Um dos objetivos da tese foi avaliar o efeito da profundidade e da área da hélice na capacidade de carga a tração relativa a hélice. Para este fim foram feitas as comparações nas Figura 5.25 e Figura 5.26.

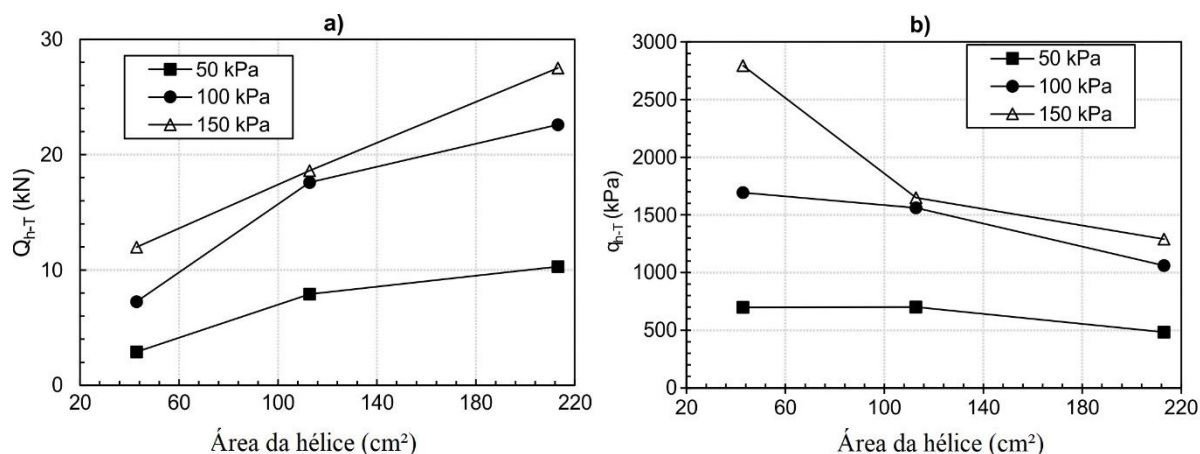
Figura 5.25: Efeito da sobrecarga vertical na tensão de ruptura da hélice ( $q_{h-T}$ ) e na carga de ruptura



Fonte: Autor.

A Figura 5.25a-b mostram que para as estacas P2 e P3 (com hélices maiores) a taxa de aumento na capacidade de carga à tração e da tensão última na tração, reduzem com as condições de tensão vertical mais elevada, provavelmente devido à diminuição do ângulo de atrito com o aumento do nível de tensão, conforme comentado anteriormente no texto.

Figura 5.26: Efeito da área da hélice na carga de ruptura em tração ( $Q_{h-T}$ ) e na tensão de ruptura da hélice em tração ( $q_{h-T}$ ).



Fonte: Autor.

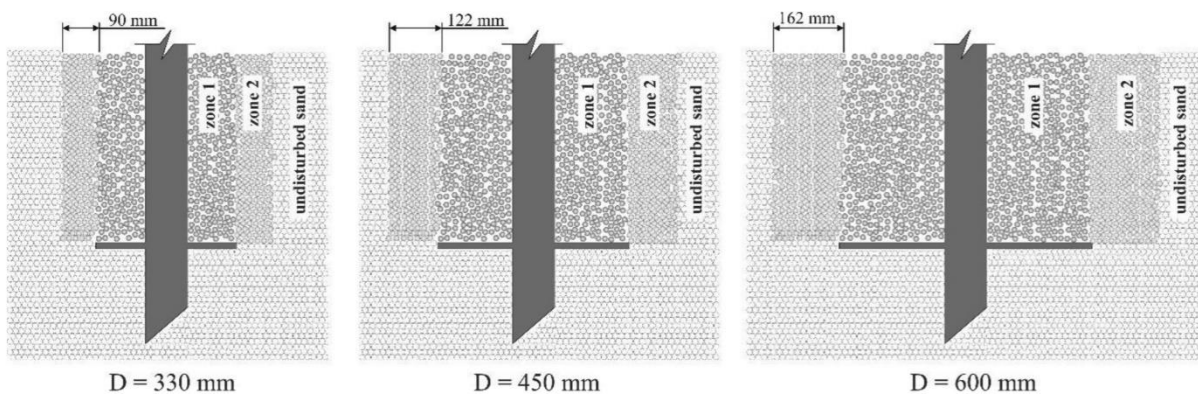
A Figura 5.26a indica que, embora a capacidade de carga à tração da hélice aumente com a área projetada da hélice de estacas sob a mesma condição de tensão vertical (Figura 5.26 a), a tensão de tração final mobilizada na hélice ( $q_{h-T}$ ) tende a diminuir com o aumento da área projetada da hélice (Figura 5.26b). Uma tendência semelhante foi observada anteriormente em Nagata e Hirata (2005). Eles investigaram o efeito da proporção de hélices no desempenho de estacas à tração usando testes de modelo em areia compacta, e também observaram que a tensão da hélice aumenta à medida que a proporção de hélice diminui.

Durante a instalação da estaca helicoidal, a areia é cortada e deslocada lateralmente e para cima, induzindo mudanças significativas de tensão no solo. A magnitude da mudança na tensão lateral depende da quantidade de perturbação do solo durante a instalação (Mitsch e Clemence, 1985). Elkasabgy e El Naggar (2013) mencionaram que a zona de perturbação do solo seria ligeiramente maior do que o diâmetro da hélice. A zona anular perturbada do solo ao redor da hélice deve aumentar com o aumento da área da hélice, como comentado em Perez et al. (2018). Como consequência, as tensões laterais que atuam na superfície de ruptura cilíndrica formada durante o arrancamento da estaca devem diminuir com o aumento do diâmetro da hélice (a distância radial entre o solo não perturbado e a superfície de ruptura é maior). Portanto,

a redução observada de  $q_{h-T}$  com a área carregada da hélice, em uma tensão de confinamento particular, mostrado na Figura 5.26a e em Nagata e Hirata (2005), pode ter ocorrido possivelmente devido à maior zona perturbada causada pela instalação de uma estaca com maior área de hélice (aumento da zona de solo movido durante a instalação). Além disso, para estacas com hélice maior, a altura da superfície de ruptura acima da hélice é maior e, portanto, a  $K_0$  médio atuando nesta superfície deve ser ligeiramente reduzida em comparação com aquela de um diâmetro de hélice menor (instalado na mesma profundidade).

O aumento do diâmetro intensificado pelo efeito de instalação na zona de solo no entorno da hélice, como citado em Perez et al. (2018), é ilustrado na Figura 5.27. Além disso, os autores mostraram numericamente que o fator de capacidade de carga em tração  $F_q$  reduz para estacas com hélices maiores, de modo a concordar com a tendência observada nesta tese.

Figura 5.27: Descrição das zonas de solo perturbado assumidas para três casos de razão  $D/d$  diferentes.



Fonte: Perez et al. (2018).

Em estacas helicoidais, a capacidade de carga à tração é mais difícil de prever em comparação com a capacidade de compressão, porque o solo que suporta o carregamento à tração é o solo perturbado acima das hélices. A equação da capacidade de carga geral de Terzaghi tem sido usada com frequência para estimar a capacidade de carga à tração da hélice de estacas helicoidais na areia. No entanto, para uma estimativa razoável seria necessário o uso de fatores de capacidade de carga à tração adequados considerando os efeitos da instalação. Existem outros métodos baseados na resistência mobilizada na superfície de ruptura acima da hélice. Diferentes autores (Nagata e Hirata 2005, Perez et al. 2018, Nagai et al. 2018) observaram que a superfície de ruptura acima da hélice simples é cilíndrica e não cônica. Por isso, Nagata e Hirata (2005), Japan Road Association (2007), Perez et al. (2018) e Nagai et al. (2018) assumiram que a capacidade de carga à tração da hélice na areia é equivalente às forças de atrito que atuam sobre uma superfície de ruptura cilíndrica.

Diante do exposto, os resultados medidos de capacidade de carga da hélice em tração,  $Q_{h-T}$ , são comparados nesta tese com valores calculados com base no método proposto pela Japan Road Association (2007), que é baseado na resistência mobilizada na superfície cilíndrica de ruptura acima da hélice.

Para o método da Japan Road Association (2007) adotou-se: para um cilindro de ruptura acima da hélice de altura igual a  $2D$  (explicado a seguir), ângulo de atrito da areia na superfície de ruptura igual ao valor de  $\phi_{cv}$  (como em Perez *et al.* 2018, para considerar o efeito da instalação), e coeficiente de empuxo na ruptura ( $K_u$ ) adotou-se o valor usado em Mitsch e Clemence (1985), proposto para considerar o efeito da instalação em estacas helicoidais. Os resultados da comparação são mostrados na Tabela 5.4.

Nagata e Hirata (2005) observaram a partir de medidores de pressão instalados em um tanque de areia (densidade relativa de 80%) que durante os testes de tração em uma estaca com uma hélice, o coeficiente de empuxo aumentou quase igual ao coeficiente de empuxo passiva perto da hélice, e diminuiu para um valor quase igual à  $K_0$  a uma distância de  $2D$  acima da hélice. Considerando esta observação, no presente estudo a capacidade da hélice de levantamento das estacas testadas é calculada assumindo uma superfície de ruptura cilíndrica com uma altura ( $h_0$ ) de  $2D$ . Além disso, Perez *et al.* (2018) assumiu que o ângulo de atrito mobilizado no plano de ruptura é o ângulo de atrito de volume constante ( $\phi_{cv}$ ) (devido à perturbação da areia).

Tabela 5.4: Comparação entre valores medidos e calculados de capacidade de carga da hélice em tração,  $Q_{h-T}$ .

Ensaio	Sobrecarga vertical (kPa)	Tipo de estaca	$Q_{h-T}(\text{medido})$ (KN)	$Q_{h-T}(\text{cal})$ (KN)	$Q_{h-T}(\text{med})/Q_{h-T}(\text{cal})$
T1	50	1	2.9	4.3	0,67
T2	100		7.3	8.5	0.85
T3	150		12.0	12.8	0.94
T4	50	2	7.9	9.5	0.83
T5	100		17.6	19.0	0.92
T6	150		18.6	28.5	0.65
T7	50	3	10.3	17.0	0.60
T8	100		22.4	34.1	0.66
T9	150		27.5	51.1	0.54

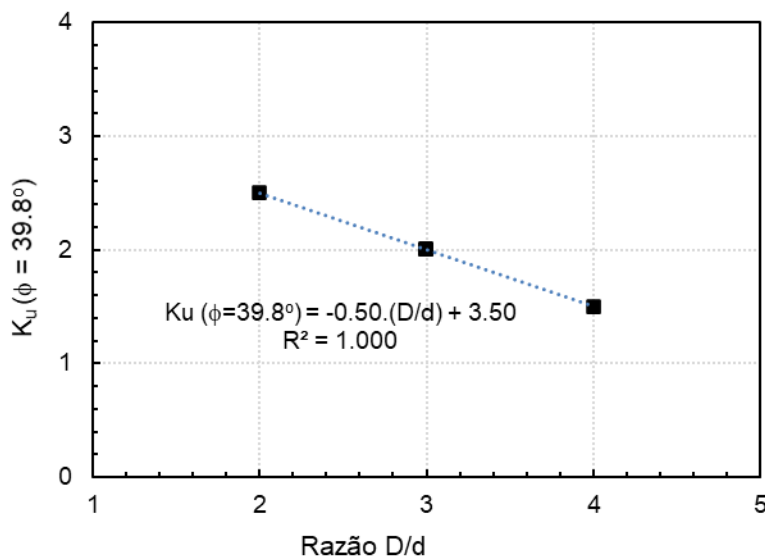
Fonte: Autor



A comparação da Tabela 5.4 mostra que o método de cálculo subdimensionou o valor de  $Q_{h-T}$  para a estaca menor, e superdimensionou para a estaca maior. Provavelmente porque o aumento do diâmetro intensifica o efeito de instalação na zona de solo no entorno da hélice, como mencionado em Perez et al. (2018), de modo a reduzir o valor das tensões horizontais na ruptura para estacas de maior hélice, como citado anteriormente. E o método propõe um valor único de  $K_u$ , independentemente do tamanho da hélice (maior ou menor efeito de instalação no  $\sigma_h$ ).

Considerando-se nesta tese as observações de Perez et al. (2018) sobre o efeito de  $D/d$ , numa tentativa de melhorar o método de previsão de capacidade de carga da hélice em tração,  $Q_{h-T}$ , por meio de retro análise, tentou-se encontrar uma relação entre  $K_u$  (para a areia de ângulo de atrito igual a  $39.8^\circ$  quando intacta) e da razão  $D/d$  de modo que proporcionasse valores calculados de  $Q_{h-T}$  mais próximos dos valores medidos. Os resultados da relação são mostrados na Figura 5.28. A Figura 5.28 mostra que existe uma relação praticamente linear entre o valor de  $K_u$  e a razão  $D/d$ .

Figura 5.28: Relação entre  $K_u$  e a razão  $D/d$ .



Fonte: Autor.

A Tabela 5.5 mostra a comparação entre os valores medido de  $Q_{h-T}$  com os valores previstos pelo método da Japan Road Association (2007) adaptado, considerando a variação de  $K_u$  com a razão  $D/d$ . Deste modo, o método pode ser reescrito pela seguinte equação 5.1, proposta nesta tese:

$$Q_{h-T} = \sigma_v \cdot K_u \cdot \tan\phi_{cv} \cdot \pi D h_0 \quad 5.1$$

Onde:

$\sigma_v$  = Tensão vertical na profundidade do cilindro de ruptura ( $H - h_0/2$ ), onde  $H$  é a profundidade da hélice, e  $h_0$  é o comprimento da zona de ruptura acima da hélice ( $h_0 = 2D$ )

$K_u$  = Coeficiente de empuxo na ruptura em tração, variável com  $\phi$ , e com a razão  $D/d$  da estaca helicoidal

Usando-se a equação 5.1, e a equação mostrada na Figura 5.28, para estimar os valores de  $K_u$  de acordo com a razão  $D/d$ , temos na Tabela 5.5 a comparação entre os valores medidos e calculados de capacidade de carga a tração da hélice,  $Q_{h-T}$ .

Tabela 5.5: Comparação entre valores medidos e calculados (com o ajuste de  $K_u$ ) de capacidade de carga da hélice em tração,  $Q_{h-T}$ .

Ensaio	Sobrecarga vertical (kPa)	Tipo de estaca	$Q_{h-T}(\text{medido})$ (kN)	$Q_{h-T}(\text{cal})$ (kN)	$Q_{h-T}(\text{med})/Q_{h-T}(\text{cal})$
T1	50		2.9	3.2	0.9
T2	100	1	7.3	6.4	1.13
T3	150		12.0	9.6	1.25
T4	50		7.9	7.2	1.10
T5	100	2	17.6	14.3	1.23
T6	150		18.6	21.5	0.87
T7	50		10.3	12.8	0.80
T8	100	3	22.4	25.6	0.88
T9	150		27.5	38.5	0.72
Valor médio de $Q_{h-T}(\text{med})/Q_{h-T}(\text{cal})$					0.99
Desvio padrão					0.19
Coeficiente de variação					0.20

A comparação entre os resultados previstos e medidos apresentados na Tabela 5.5, mostra que o valor médio de  $Q_h$  (medido) /  $Q_h$  (calculado) igual a 0,99, com um coeficiente de variação de 20%, indica uma concordância razoável entre os resultados previstos e experimentais deste estudo. No entanto, a Tabela 5.5 mostra que o método avaliado superestimou os valores de  $Q_{h-T}$  para o caso da maior hélice (P3). Este efeito da área da hélice no desempenho do método sugere que para estacas com maior razão de hélice, a tensão lateral

atuando na superfície de ruptura é reduzida devido aos efeitos de instalação, conforme mencionado anteriormente. Além disso, os valores medidos de tensão mobilizada na hélice do estudo atual diminuíram com o aumento da razão de hélice (tendência semelhante também observada em Nagata e Hirata, 2005). Conseqüentemente, o uso de um valor  $K_u$  único para todas as estacas testadas, independente da razão de hélices, pode ser o motivo da divergência entre os resultados medidos e previstos obtidos nos testes na estaca com maior área de hélice. Portanto, novos experimentos são necessários para quantificar o efeito da área da hélice (ou razão das hélices) sobre o valor de  $K_u$ , para o aprimoramento dos métodos de estimativa da capacidade de carga à tração de estacas helicoidais em areia.

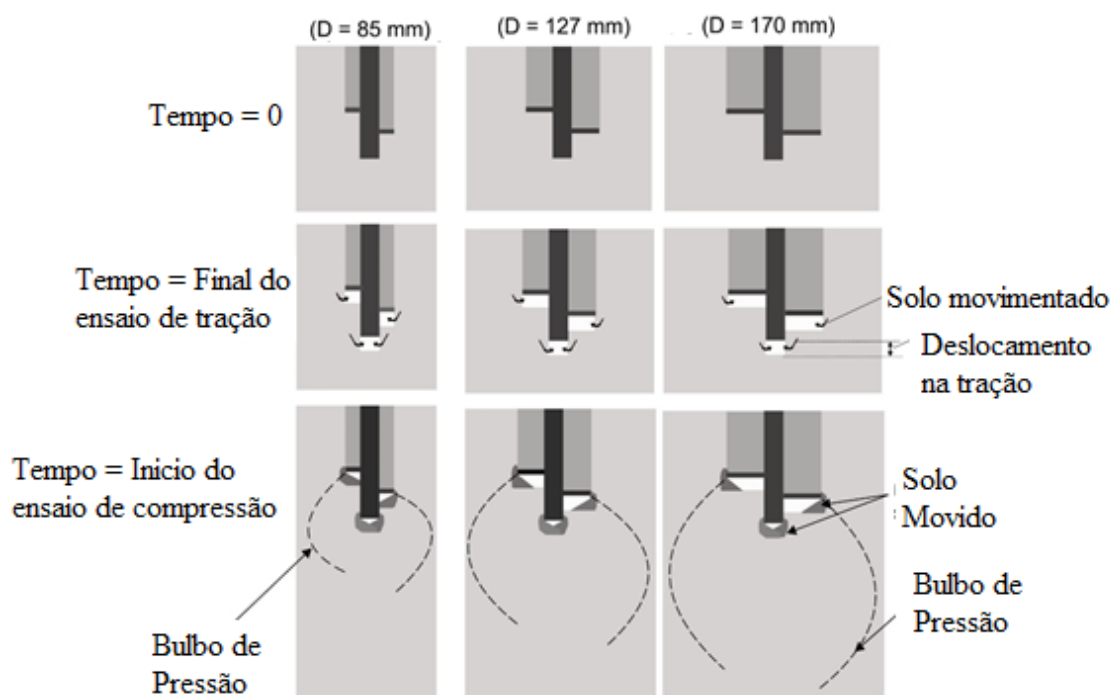
Outro aspecto importante observado nos resultados da Tabela 5.5 é que, mesmo reduzindo o valor de  $K_u$  para a estaca com hélice maior (P3), o método apresentado ainda superestimou os valores de  $Q_{h-T}$  para as estacas P2 e P3 (hélices maiores) sob condição de tensão de sobrecarga vertical mais alta (150 kPa). Essa observação indica que um segundo ajuste do método também é necessário para considerar o efeito da pressão de confinamento na capacidade de carga da hélice, discutida anteriormente. Para a estaca P1 a área da hélice é muito menor, e provavelmente por esta razão o efeito da pressão de confinamento não é perceptível sob carga de tração.

#### 5.2.4 Ensaio de Compressão

##### 5.2.4.1 Resultados medidos nas estacas nos ensaios de compressão

Antes de apresentar este capítulo, vale ressaltar que antes do ensaio de compressão as estacas modelo "subiram" em média 25 mm nos ensaios de tração. Quando a estaca se desloca para cima no ensaio de tração, o solo lateral se movimentava para baixo da hélice. Fica uma zona de solo "fofo" debaixo da hélice, que vai receber as cargas iniciais do ensaio de compressão. Este mecanismo é ilustrado na Figura 5.29 (para um deslocamento no ensaio de tração de 25 mm).

Figura 5.29: Efeito do ensaio de tração anterior ao ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

Nos ensaios de tração nas estacas modelo desta tese, em quase todos os casos as estacas deslocaram (subiram) um deslocamento em torno de 25 mm, com exceção do ensaio T2, na estaca P1 com sobrecarga vertical de 100 kPa, a qual deslocou 46 mm (mais de  $0,5D$ ). Portanto, considerando que neste caso (T2) este maior deslocamento na tração pode ter afetado o comportamento na compressão, este ensaio foi excluído das análises.

Vale ressaltar que, na fase de descarregamento dos ensaios de tração, os deslocamentos (para baixo) foram praticamente inexistentes. Isto ocorreu provavelmente devido ao movimento de solo para baixo das hélices durante os ensaios de tração, como mostra a Figura 5.29.

Considerando-se a influência dos ensaios de tração no início dos resultados de “carga x recalque” dos ensaios de compressão, e que a maioria dos ensaios de compressão não chegaram a ruptura física (como observado nos ensaios de tração), para a interpretação da carga de ruptura em compressão adotou-se o critério da carga equivalente ao deslocamento relativo a  $10\%D$  (frequentemente usado na literatura).

No entanto, para definir o deslocamento de referência para aplicar este critério (para proporcionar condição equivalente a uma estaca que não tivesse sido ensaiada anteriormente), adotou-se dois procedimentos: (1) assumir o início da curva após a taxa de deslocamento inicial diminuir, visto que a elevada taxa inicial se deve a mobilização (compactação) do solo movido “fofo” ilustrado na Figura 5.29; e (2) assumir o início da curva no momento que a leitura no

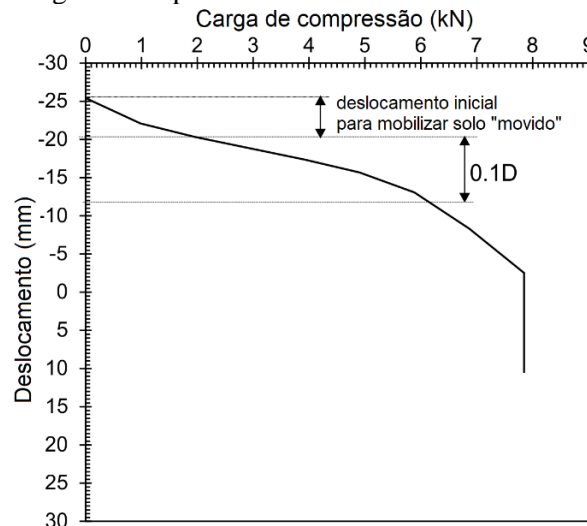
sensor 3 (posicionado a 1000 mm de profundidade, logo abaixo do nível da hélice) começa a aumentar significativamente.

As Figura 5.30 até Figura 5.37 mostram os resultados dos ensaios de compressão nas estaca modelo P1, P2 e P3, para as tensões de sobrecarga vertical de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente. Nestas figuras são indicados o início da curva adotado (critério explicado acima), e o valor de deslocamento correspondente a 10%D, após este início, para a estimativa futura da carga de ruptura.

Como citado no texto anteriormente, o caso da estaca P1 sob 100 kPa foi excluído das análises devido ao maior deslocamento sofrido no ensaio de tração.

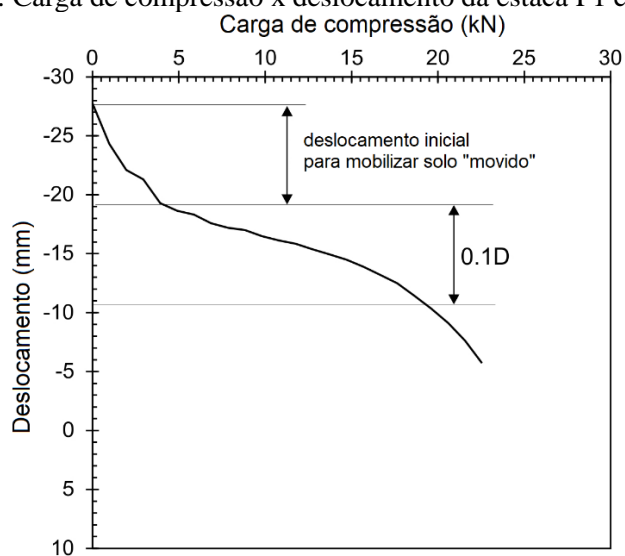
Nos ensaios de compressão verificou-se que praticamente não houve diferença entre a carga de medida pela célula de carga na cabeça da estaca, e a medida logo acima da hélice, por meio da instrumentação (*strain-gauge*). Provavelmente por que os casos de estacas que tiveram um pouco de resistência por atrito na haste nos ensaios de tração (não significantes), após a ruptura em tração “relativamente muito pequena”, a resistência por atrito praticamente se anulou. Por essa razão as curva nas Figura 5.30 a Figura 5.37 os resultados apresentados são relativos a mobilização de carga na hélice e sob a ponta da estaca, já que o carregamento e em compressão.

Figura 5.30: Carga de compressão x deslocamento da estaca P1 com 50 kPa.



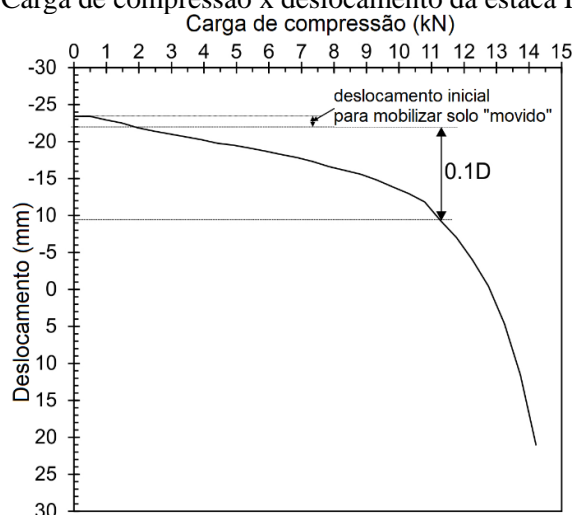
Fonte: Autor.

Figura 5.31: Carga de compressão x deslocamento da estaca P1 com 150 kPa.



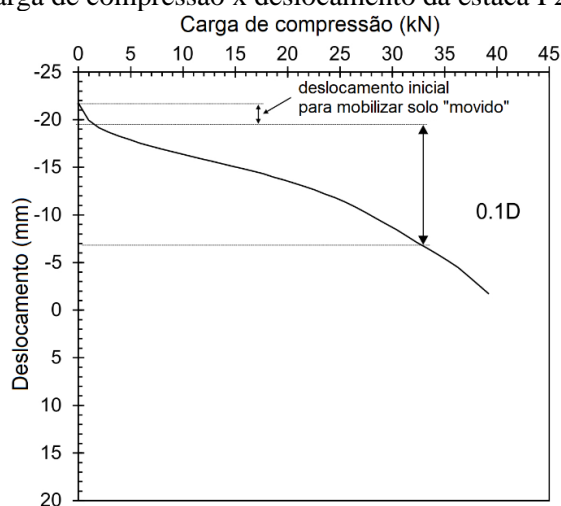
Fonte: Autor.

Figura 5.32: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 50 kPa.



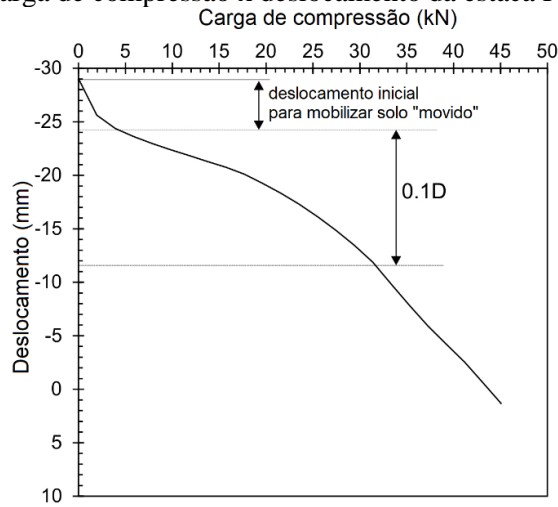
Fonte: Autor.

Figura 5.33: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 100 kPa.



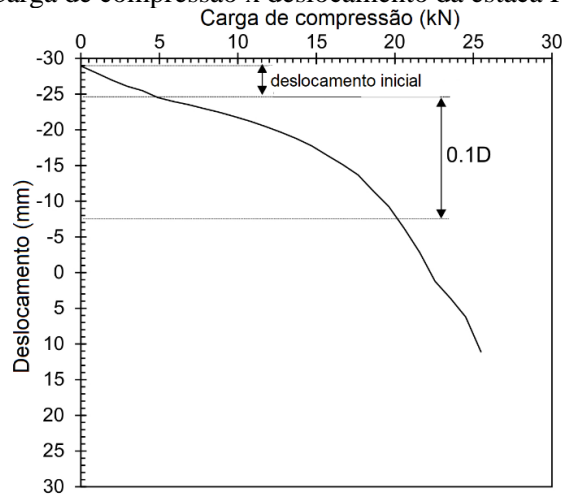
Fonte: Autor.

Figura 5.34: Carga de compressão x deslocamento da estaca P2 com 150 kPa.



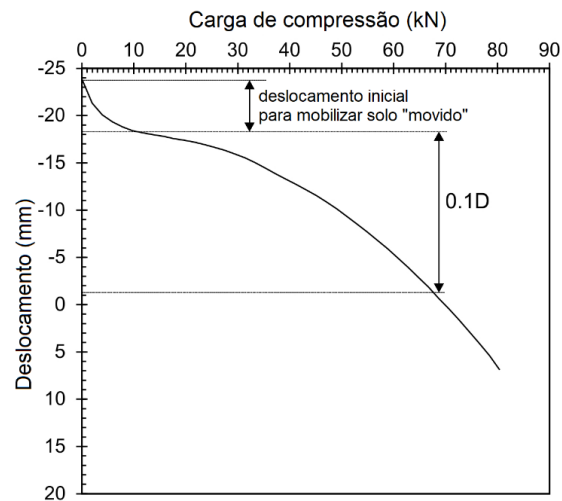
Fonte: Autor.

Figura 5.35: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 50 kPa.



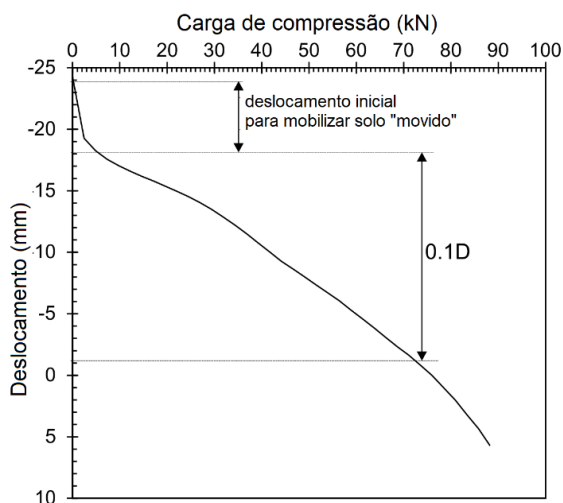
Fonte: Autor.

Figura 5.36: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 100 kPa.



Fonte: Autor.

Figura 5.37: Carga de compressão x deslocamento da estaca P3 com 150 kPa.

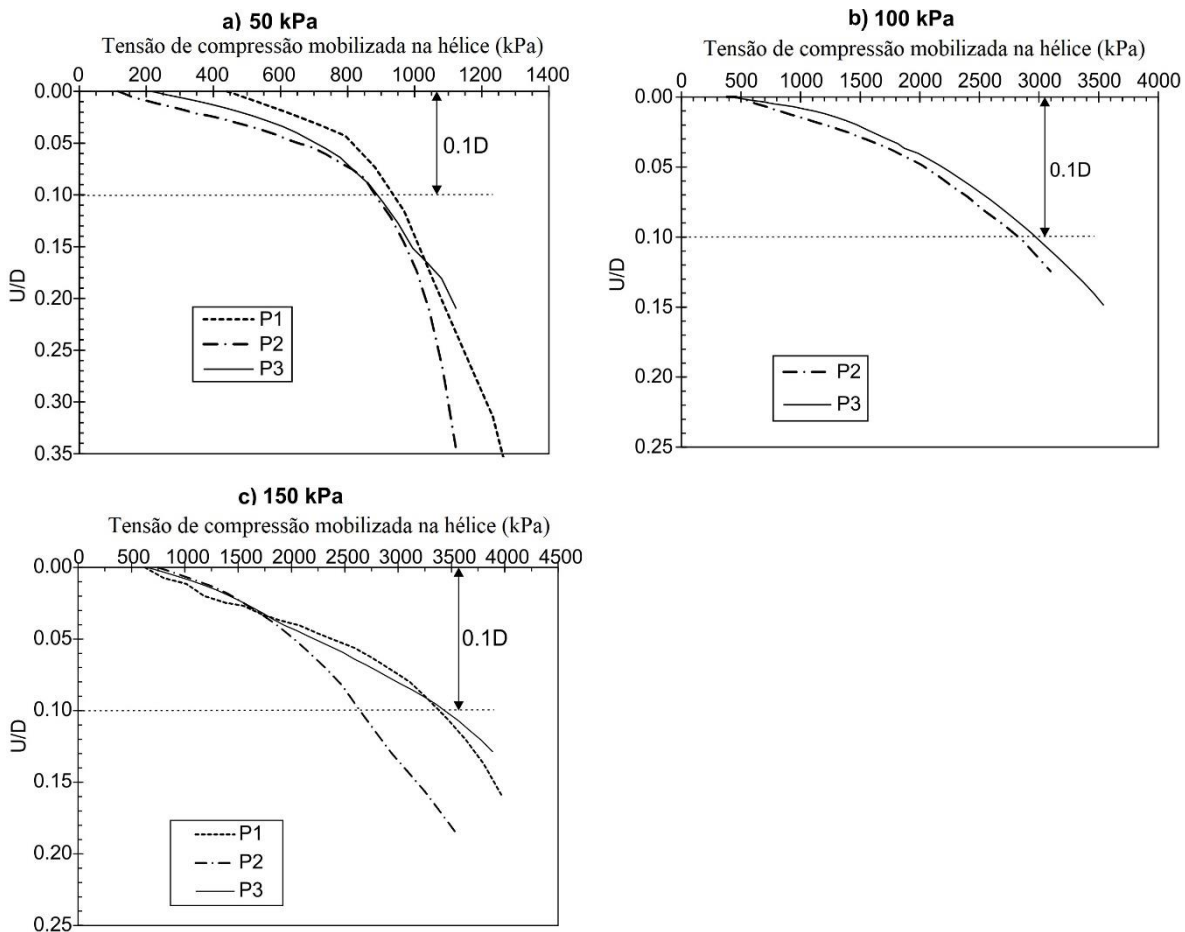


Fonte: Autor.

A Figura 5.38a, b e c mostram os resultados da tensão mobilizada na hélice vs deslocamento da cabeça da estaca ( $U$ ) normalizado pelo diâmetro da hélice ( $D$ ) durante os testes de compressão nas estacas P1, P2 e P3, considerando o deslocamento zero da estaca após o momento em que o solo intacto abaixo da hélice começa a ser mobilizado. A tensão mobilizada na hélice em compressão foi estimada considerando a área da ponta da estaca (mobilizada apenas na compressão). Em geral, a Figura 5.38a-c indica que para as três condições de tensão vertical avaliadas, as curvas de deslocamento normalizadas obtidas tendem a ser semelhantes para os três diâmetros de hélice testados (relações de hélice). Porém, a curva da estaca P2 abaixo de 150 kPa (Figura 5.38c) mostra um valor de tensão de compressão mobilizada na hélice, para um deslocamento de  $0,1D$ , 23% menor em relação às estacas P1 e P3. Provavelmente essa diferença se deve a possíveis erros na interpretação do efeito do carregamento de tração anterior na resposta à compressão da estaca P2 abaixo de 150 kPa.



Figura 5.38: Tensão de compressão x deslocamento normalizado.



Fonte: Autor.

A Figura 5.38 mostra que a curva obtida para a estaca com maior hélice (P3) apresenta uma diminuição da taxa de deslocamento após um deslocamento de aproximadamente  $0,15D$ . Essa alteração provavelmente ocorreu porque na estaca P3 a distância vertical entre a hélice e a base do tanque é menor em comparação com as demais estacas.

O'Neill (1991) citou que as estacas modelo são normalmente instaladas cerca de 5 diâmetros da estaca acima da base da câmara. Porém, de acordo com Yang (2006), a zona de influência (abaixo da ponta) para a capacidade de carga última de estacas em areia limpa varia de  $3,5$  a  $5,5D$ . No estudo atual, as estacas P1, P2 e P3 foram instaladas em aproximadamente  $6D$ ,  $4D$  e  $3D$  acima da base da câmara, respectivamente. Adicionalmente, conforme mostrado anteriormente nesta Tese, o autor realizou um estudo de modelagem numérica, utilizando Plaxis 2D, para avaliar os efeitos de contorno para os testes atuais, e não observou influência significativa da proximidade da hélice da estaca P3 à base do tanque nos resultados da compressão da estaca desempenho. No entanto, com base nos estudos citados acima

mencionados, e nos resultados da Figura 5.38, possivelmente os resultados da estaca P3 são afetados pelo efeito de contorno para deslocamentos superiores a 0,1D.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados de capacidade de carga resistida pela hélice na compressão ( $Q_{h-C}$ ) nas estacas modelo desta pesquisa. Nesta tabela são mostrados os valores relativos ao deslocamento da estaca igual 10%D,  $Q_{h-C(0.1D)}$ , que é um critério de ruptura utilizado frequentemente para este tipo de estaca. Também são mostrados os valores em forma de tensão de ruptura da hélice na compressão,  $q_{h-C(0.1D)}$ . Para estimar a tensão de ruptura na compressão, área da hélice líquida é somada a área da ponta da estaca (ponta mobilizada apenas na compressão).

No item 5.4.4.3 os resultados mostrados na Tabela 5.6 e nas curvas “carga x deslocamento” em compressão são discutidos em detalhe.

Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de compressão T1 a T9.

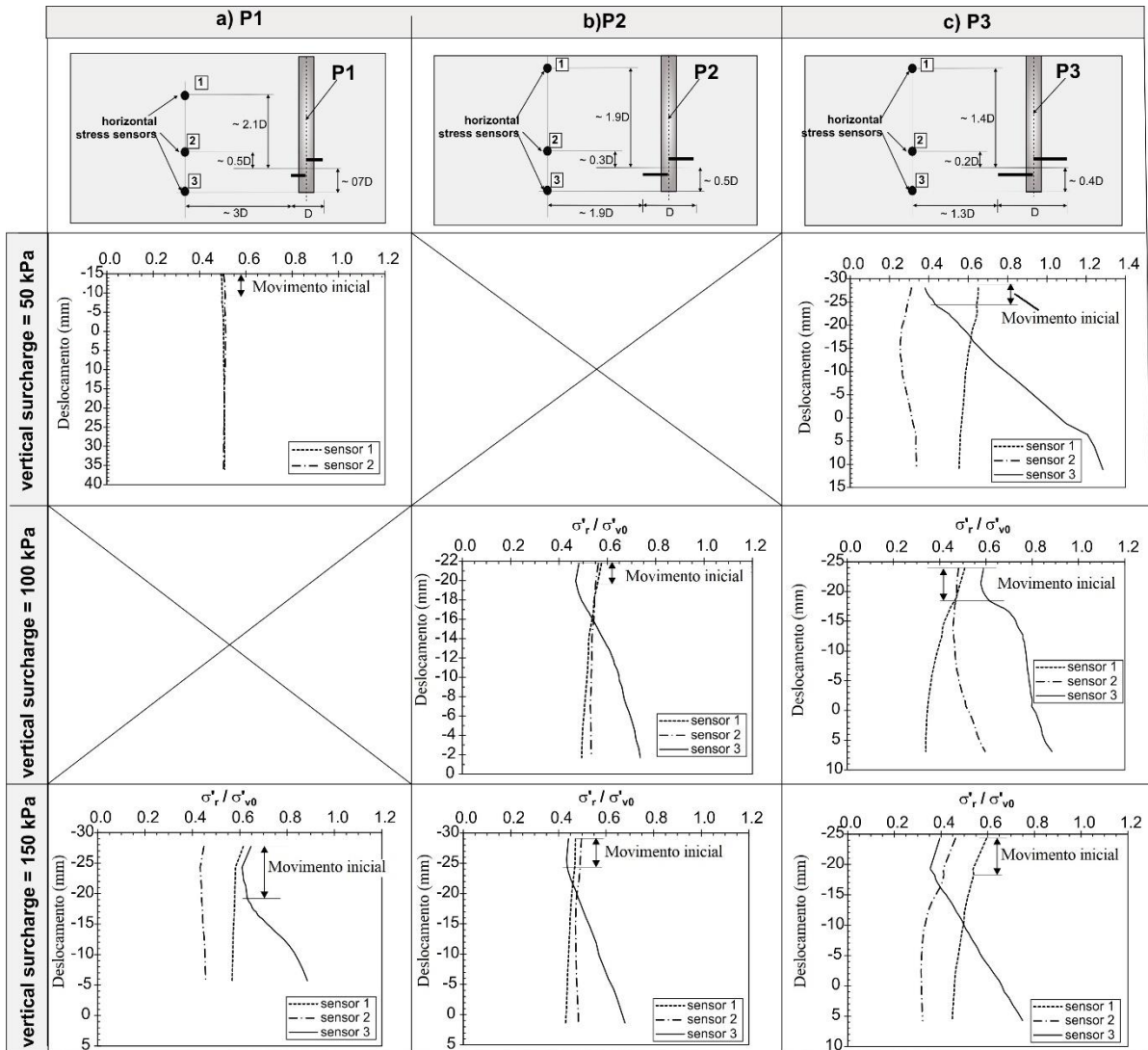
Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	$Q_{h-C(0.1D)}$ (KN)	$q_{h-C(0.1D)}$ (KPa)
T1	50	P1	5.3	934
T3	150		19.3	3401
T4	50	P2	11.3	892
T5	100		33	2605
T6	150		31.5	2487
T7	50	P3	20.2	890
T8	100		67.8	2987
T9	150		72.5	3194

Fonte: Autor.

#### 5.2.4.2 Resultados medidos no solo nos ensaios de compressão

A variação da relação  $\sigma'_r/\sigma'_{v0}$  no solo ao redor da estaca durante os ensaios de compressão é apresentada na Figura 5.39. Conforme citado anteriormente, os ensaios de compressão foram realizados após os ensaios de tração; portanto, as leituras de tensão do sensor 3 foram fundamentais para a interpretação do deslocamento inicial a ser considerado para as curvas mostradas na Figura 5.30 até Figura 5.38 do item anterior (ponto de transição após o qual a hélice mobilizou o solo "virgem" intacto, e o efeito do anterior teste de tração pode ser negligenciado).

Figura 5.39: Variação das tensões radiais durante os ensaios de compressão nas estacas P1, P2 e P3 sob sobrecarga vertical de 50kPa, 100 kPa e 150 kPa.



Fonte: Autor.

A Figura 5.39 ilustra que após o término dos testes de tração (e no início dos testes de compressão) as tensões radiais no solo nas localizações dos sensores estão próximas da condição  $K_0$ . Em geral, esta figura indica que as tensões radiais na posição do sensor 3 (abaixo do nível da hélice) diminuem ligeiramente no início do ensaio de compressão (fase em que a hélice e a ponta da estaca mobilizam [compactam] o solo “movido” abaixo da hélice) para um ponto de transição onde a tensão radial começa a aumentar significativamente. A partir desse ponto crítico (equivalente ao final da mobilização do solo solto) foi assumido que a hélice e a ponta da estaca mobilizam o solo intacto. Os resultados do sensor 3 também mostram que o aumento das tensões radiais registradas no nível abaixo da hélice durante o ensaio de

compressão é maior para o maior diâmetro da hélice (P3). Isso ocorre porque a borda externa da hélice maior está mais próxima do sensor.

As medições nos 2 sensores posicionados em níveis diferentes acima da hélice (sensores 1 e 2) mostram que as tensões radiais diminuem à medida que o deslocamento da estaca aumenta (movimento para baixo da hélice). Esta redução é mais importante no teste da maior estaca helicoidal, pois neste caso a borda da hélice está mais próxima dos sensores. Por fim, a variação da relação  $\sigma'_r/\sigma'_{v0}$  na posição do sensor 3 no solo (abaixo do nível da hélice) obtida durante os testes na estaca P3 (borda da hélice mais próxima da posição do sensor) é maior durante o teste sob menor tensão vertical (50 kPa). Este fato pode estar ligado à redução do ângulo de atrito da areia ( $e K_p$ ) com o aumento do nível de tensão, conforme mencionado anteriormente no texto.

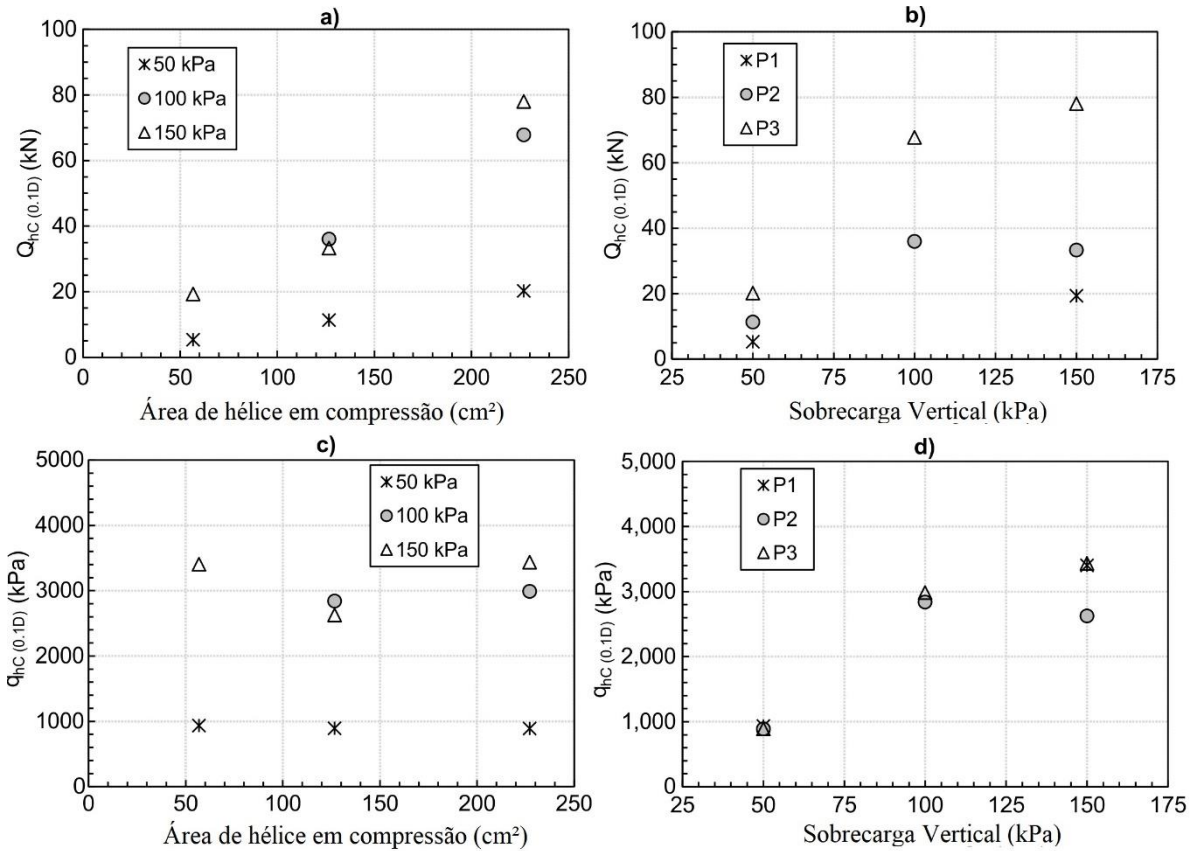
#### 5.2.4.3 Análise dos resultados dos ensaios de compressão

Um dos objetivos da tese foi avaliar o efeito das tensões de sobrecarga (profundidade) e da área da hélice na capacidade de carga a compressão relativa a hélice. Para este fim foram feitas as comparações na Figura 5.40.

As Figura 5.40a e c indicam que embora para uma determinada condição de tensão vertical a capacidade de carga da hélice em compressão ( $Q_{h-c}$ ) aumente com a área da hélice (considerando a área da ponta da estaca), a tensão mobilizada na hélice,  $q_{h-c}$  (0,1 D) parece ser independente da área da hélice. Este comportamento é diferente daquele observado para as estacas sob carregamento de tração. Portanto, o efeito da relação de hélices observado nos ensaios de tração não ocorre para a estaca sob carga de compressão, provavelmente porque neste caso a hélice mobiliza o solo intacto, praticamente não afetado pelo procedimento de instalação.

As Figura 5.40b e d mostram que, conforme observado para os ensaios de tração, a capacidade de carga da hélice em compressão aumenta com a tensão vertical até um certo valor e, então, a taxa de aumento torna-se menor. Essa tendência deve ocorrer devido à diminuição do ângulo de atrito da areia com o aumento da sobrecarga de confinamento. Porém, conforme ilustrado na Figura 5.40, a capacidade de carga da hélice da estaca P2 de 150 kPa é 7,5% menor que o valor obtido para a estaca P2 de 100 kPa. O possível erro neste resultado, mencionado anteriormente no texto, não influencia consideravelmente a tendência geral dos gráficos mostrados nesta figura.

Figura 5.40: Carga de ruptura e tensão de ruptura na hélice na compressão x área da hélice e a sobrecarga vertical.



Fonte: Autor.

### 5.2.5 Análise da relação entre capacidade de carga a tração e a compressão

Inicialmente, para avaliar se a ordem de grandeza dos valores medidos na tese de tensão de ruptura na hélice em tração ( $q_{h-T}$ ) e em compressão ( $q_{h-C}$ ), foi consultado a trabalho de Gavin *et al.* (2018), onde foi ensaiada uma estaca helicoidal de única hélice ( $D=440$  mm e  $d=110$  mm) em tração e em compressão, instalada em areia bem compacta. Neste trabalho o valor medido de  $q_{h-T}$  e  $q_{h-C}$ , baseados no critério de ruptura 10%D, foram em torno de 1500 kPa e 3000 kPa, respectivamente. Ambos valores estão dentro da faixa de variação encontrada nesta tese, o que valida a técnica de câmara de calibração para estudar capacidade de carga das hélices de estacas helicoidais.

Lutenegger e Tsuha (2015) afirmam que a questão mais importante que deve ser considerada no projeto de fundações helicoidais é o grau de perturbação do solo durante a instalação. No caso das estacas helicoidais, durante a instalação a lâmina da hélice “corta” o

solo e desloca este material para cima para permitir o avanço da hélice. Estes autores observaram que a razão T/C (capacidade de carga a tração / capacidade de carga a compressão) das estacas instaladas em solos arenosos varia cerca de 0,5 a 1,0, sugerindo a ocorrência de efeitos de instalação consideráveis em alguns casos. Além disto, eles afirmam que o monitoramento do torque da instalação, a taxa de avanço e velocidade de rotação são importantes medida de controle da qualidade que podem dar pistas sobre o grau de perturbação produzida.

De acordo com Trofimenkov & Mariupolskii (1965), a capacidade de carga de uma estaca helicoidal com uma única hélice, submetida à compressão é maior do que no caso de tração, devido aos seguintes fatores: (1) no ensaio de compressão o carregamento na hélice é resistido pelo solo intacto; (2) a área da hélice que trabalha na compressão na estaca é maior que a área que trabalha em tração por conta da área de ponta da haste; e (3) a densidade do solo geralmente aumenta com a profundidade. Eles concluíram que a capacidade de carga a compressão é cerca de 1,4 a 1,5 vezes a capacidade de carga a tração da estaca.

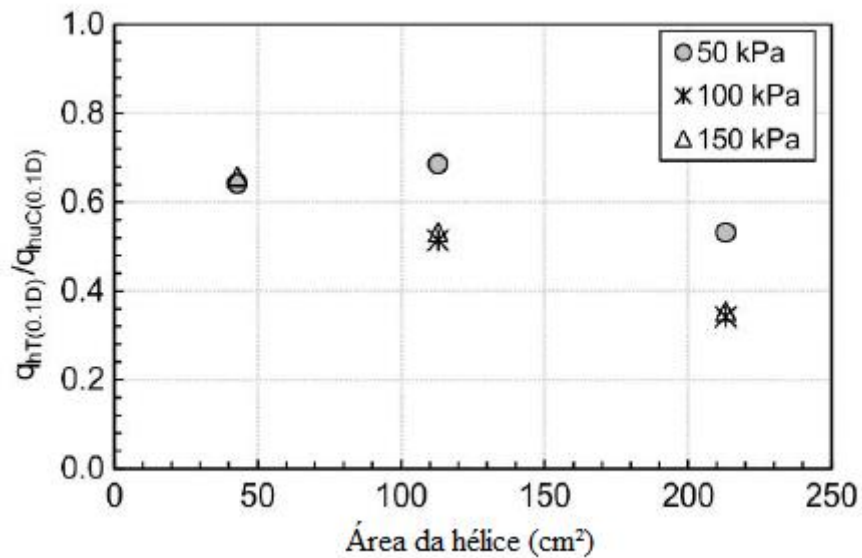
Para verificar esta relação T/C, com base nos resultados desta tese, foi comparada as tensões de ruptura da hélice em tração ( $q_{h-T}$ ) e em compressão ( $q_{h-C}$ ), com base no critério de deslocamento relativo a 10%D na interpretação das curvas carga x deslocamento dos ensaios. Os valores da relação tensão de tração/compressão ( $q_{h-T}/q_{h-C}$ ), foram sugeridos por Lutenegger e Tsuha (2015) para avaliar o grau de perturbação do solo durante a instalação das estacas. Os resultados desta comparação são mostrados na Tabela 5.7 e nas

Figura 5.41 e Figura 5.42.

Tabela 5.7: Relação entre tensões de ruptura da hélice em tração ( $q_{h-T}$ ) e em compressão ( $q_{h-C}$ ),

Ensaio	Sobrecarga vertical (kPa)	Tipo de estaca	$q_{h-T(0.1D)}$ (KPa)	$q_{h-C(0.1D)}$ (KPa)	$q_{h-T(0.1D)}/q_{h-C(0.1D)}$
T1	50	P1	600	934	0.64
T3	150		2249	3401	0.66
T4	50	P2	612	892	0.69
T5	100		1462	2605	0.56
T6	150		1400	2487	0.56
T7	50	P3	474	890	0.53
T8	100		1023	2987	0.34
T9	150		1220	3194	0.38

Fonte: Autor.

Figura 5.41: Razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  x área da hélice.

Fonte: Autor.

Na

Figura 5.41 pode-se verificar que a razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  diminuiu com o aumento da área da hélice. Esta redução ocorre porque quanto maior a área da hélice menor o valor de  $q_{h-T}$ . Como comentado anteriormente neste capítulo, a tensão de ruptura da hélice na tração é prejudicada pelo efeito da instalação, o qual aumenta com o tamanho da hélice, enquanto que a tensão de ruptura da hélice na compressão não sofre este efeito de instalação, por ser relativa ao solo intacto abaixo da hélice. Portanto, a

Figura 5.41 mostra que existe um efeito da razão  $D/d$  nesta relação para estacas helicoidais em areias compactas, observado pela primeira vez nesta tese.

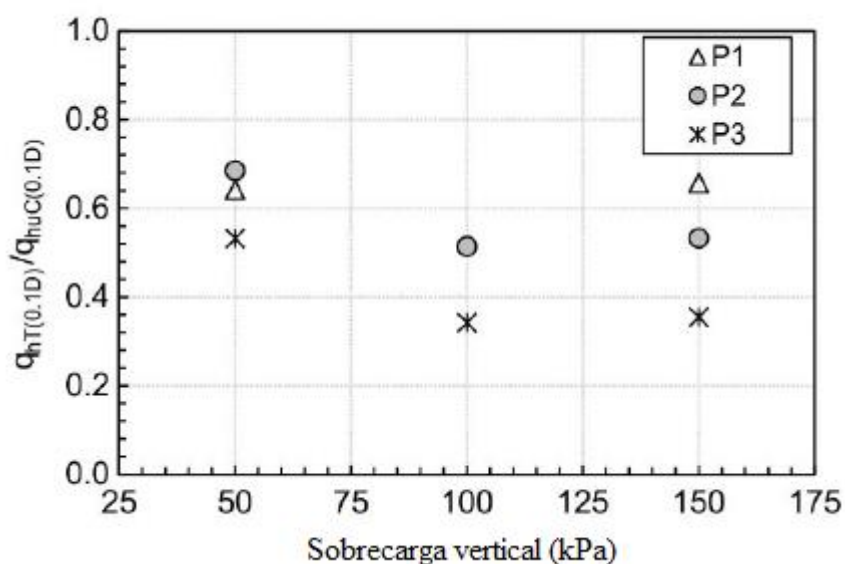
Para verificar se os valores da razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  encontrados nesta tese são compatíveis com encontrados na prática deste tipo de estaca, comparou-se o resultado valores da razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$

igual 0,5, encontrado em Gavin et al. (2018) para estaca helicoidal com  $D/d=4$ , em areia compacta, com os valores mostrados na

Figura 5.41 desta tese. Nota-se que nos resultados da tese, para a estaca com  $D/d = 4$  (maior área testada) a razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  variou de 0,34 a 0,53. Portanto o valor da razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  encontrado na prática de estacas helicoidais em areia compacta, com a mesma razão  $D/d=4$  testada nesta tese, está dentro da faixa de resultados encontrados nesta pesquisa.

Na Figura 5.42, pode-se verificar que a razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  diminuiu com o aumento de confinamento de 50kPa para 100kPa. No entanto esta redução não ocorre de 100 kPa para 150 kPa. Provavelmente esta tendência apresentada na figura está relacionada ao conceito de “profundidade crítica” discutido anteriormente na tese (maiores sobrecarga simulam maiores profundidades *in situ* na câmara de calibração). Esta figura ressalta que em menores profundidades (menor sobrecarga vertical) a diferença entre tensão de ruptura na tração e na compressão tende a ser menor.

Figura 5.42: Razão  $q_{h-T}/q_{h-C}$  x sobrecarga vertical.



Fonte: Autor.

## 5.2.6 Análise do fator de torque das hélices ( $K_T$ -hélice)



Como comentado anteriormente na revisão bibliográfica, existe uma relação entre capacidade de carga à tração e torque final de instalação de estacas helicoidais, representada pelo fator de torque  $K_T$ . Nesta tese, o foco foi estudar os forças de instalação e o comportamento da estaca relativo a parcela da hélice, pois a técnica da modelagem em câmara de calibração não permite estudar no mesmo ensaio o acréscimo de torque resistido por atrito na haste conforme a estaca avança em profundidade. Além disso, a parcela de torque mais importante da instalação de estacas helicoidais é a parcela resistida pela hélice. Portanto, neste trabalho foi calculado os valores de  $K_{T\text{-hélice}}$ , que é a razão entre a capacidade de carga da hélice em tração e o torque de instalação resistido pela hélice. Este valor foi calculado dividindo os valores de  $Q_{h-T(\text{pico})}$  pelo  $T_{h(\text{pausa})}$ , como mostra a Tabela 5.8.

Na Tabela 5.8, apresenta-se também os valores do fator adimensional de torque obtido multiplicando-se o valor de  $K_{T\text{-hélice}}$  pelo diâmetro da hélice, como recomendado em Byrne e Houlsby (2015), para eliminar o efeito do tamanho da hélice no  $K_T$ . Estes autores, a partir de resultados selecionados da literatura sobre estacas helicoidais, encontraram valores médios de fator adimensional de torque variando entre 5,0 e 14,4. Na presente pesquisa, os valores de fator adimensional de torque relativo apenas à parcela da hélice ( $K_{T\text{-hélice}} \cdot D$ ) variaram de 4,6 a 15,3, como mostra a Tabela 5.8. Portanto estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura. Porém, aqui cabe-se uma crítica sobre este valor de  $k_T$ , como foi visto, a variação é muito grande (podendo variar em até 3x quando adimensional) e tal fator não ajuda muito no controle de instalação da estaca. Por isto é necessário que se criem outros parâmetros de controle além do  $k_T$ .

Os valores e  $K_T$  e  $K_{T\text{-hélice}}$  podem ser comparáveis, visto que as parcelas de capacidade de carga e de torque relativas as hélices é predominante no caso de estacas helicoidais, como mostrado em Santos Filho *et al.* (2014).

Tabela 5.8: Resultados de  $K_{T\text{-hélice}}$  (fator de torque relativo a hélice)

Ensaio	Sobrecarga vertical no ensaio (kPa)	Tipo de estaca	$T_{h\text{-pausa}}$ N.m	$T_{h\text{-médio}}$ N.m	$Q_{h-T(\text{pico})}$ (KN)	$K_{T\text{-hélice}}$ ( $Q_{h-T(\text{pico})} / T_{h\text{-pausa}}$ ) ( $m^{-1}$ )	$K_{T\text{-hélice}} \cdot D$
T1	50		53.4	49.2	2.9	54	4.6
T2	100	P1	111.7	117.9	7.3	65	5.5
T3	150		185.6	184.2	12.0	65	5.5
T4	50		65.5	68.6	7.9	121	15.3
T5	100	P2	181.4	170.2	17.6	97	12.3
T6	150		180.8	220.6	18.6	103	13.1
T7	50	P3	-	-	10.3	-	-

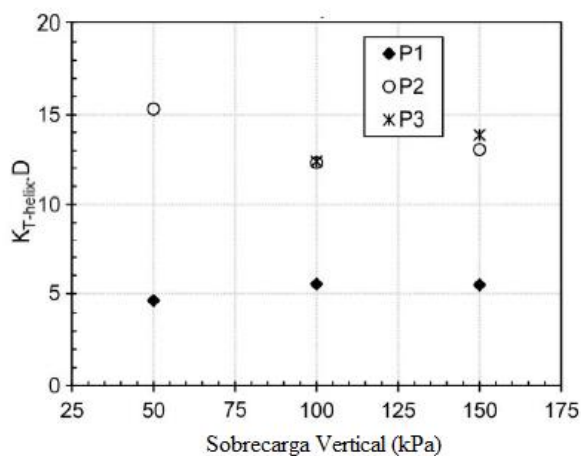
T8	100	310.0	322.9	22.4	73	12.4
T9	150	337.3	382.5	27.5	82	13.9

Fonte: Autor.

Um dos objetivos da tese foi avaliar o efeito das tensões de sobrecarga (profundidade) e da área da hélice no fator de torque relativo a parcela da hélice da estaca  $K_{T-hélice}$ . Para este fim foram feitas as comparações na Figura 5.43 e Figura 5.44. Nestas figuras utilizou-se o fator adimensional de torque, como recomendado por Byrne e Houlsby (2015), para analisar o efeito da profundidade e da área da hélice.

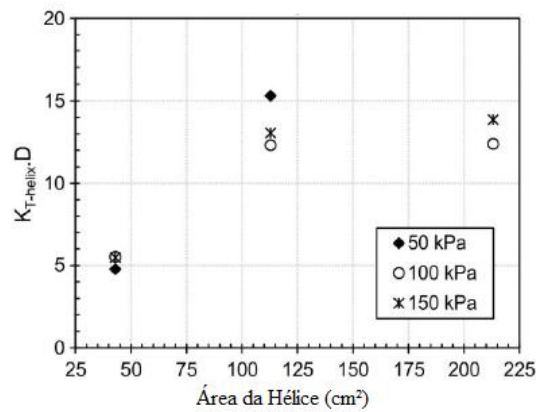
Na Figura 5.43 nota-se uma tendência deste fator adimensional diminuir com o confinamento até uma certa profundidade. Isto indica que, a partir de certa profundidade, a taxa de acréscimo de capacidade de carga a tração e de torque de instalação é a mesma conforme a estaca avança no terreno. No entanto, para menores profundidades a taxa de acréscimo de capacidade de carga é maior do que a de torque de instalação, comparada a maiores profundidades.

Figura 5.43:  $K_{T-hélice} \cdot D$  x sobrecarga vertical.



Fonte: Autor.

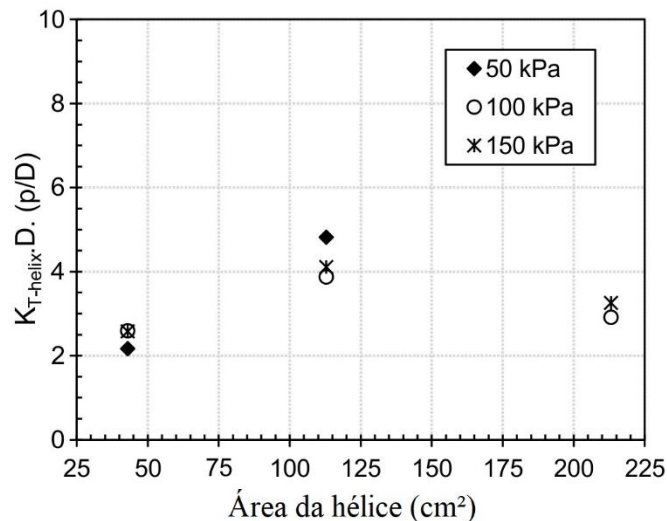
Figura 5.44:  $K_{T-hélice} \cdot D$  x área da hélice.



Fonte: Autor.

A Figura 5.44 indica que os valores do fator adimensional  $K_{T-helix}.D$  para as estacas P2 e P3 são de magnitude semelhante, e para a estaca com menor diâmetro de hélice (P1) os valores são consideravelmente menores. Esses menores valores provavelmente se devem ao maior ângulo da hélice da estaca P1, que acarreta o aumento do torque de instalação e consequentemente a diminuição da relação capacidade-torque da hélice. Portanto, para eliminar o efeito do ângulo da hélice, os valores de  $K_{T-helix}.D$  foram multiplicados pela razão  $p/D$  das estacas modelo, e os resultados são apresentados na Figura 5.45. A variação do fator adimensional multiplicado pela relação  $p/D$  com a área de carregamento da hélice é reduzida, em comparação com os resultados da Figura 5.44. O valor médio da  $K_{T-helix}.D.(p/D)$  é de aproximadamente 3,3 com um coeficiente de variação de 27%. Embora os resultados indiquem que o fator adimensional  $K_{T-helix}.D$  é influenciado pelo ângulo da hélice, testes adicionais são necessários para quantificar esse efeito.

Figura 5.45:  $K_{T-helix}.D.(p/D)$  x área da hélice.



Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho e recomendações futuras.

#### 6.1.1 Conclusões sobre a construção da câmara de calibração

As simulações numéricas realizadas antes da construção da câmara de calibração foram fundamentais para determinar o tamanho da câmara de calibração e verificar se haveria algum tipo de influência de borda e do furo central da membrana para aplicação da sobrecarga vertical no ensaio.

#### 6.1.2 Conclusões dos ensaios realizados na câmara de calibração

As principais conclusões obtidas a partir dos ensaios realizados na câmara de calibração são as seguintes:

1. Durante a instalação da estaca, é possível verificar que as tensões horizontais no solo vão aumentando de acordo com a aproximação da hélice, até alcançar um pico, diminuindo logo em seguida. Este pico é verificado quando a hélice aproxima-se da profundidade em que o sensor foi instalado.
2. O torque relativo a instalação da hélice aumenta com a profundidade e com a área da hélice. Já a força de instalação só aumenta com a profundidade.
3. A tensão de ruptura da hélice, tanto na tração quanto na compressão, aumenta com a sobrecarga vertical até um certo nível de sobrecarga (100 kPa), após o qual estes valores não aumentam mais. Este fato pode estar associado ao conceito de “profundidade crítica” adotado em projetos de fundações profundas.

4. Durante o ensaio de tração, verificou-se que as tensões horizontais registradas nos sensores instalados em níveis acima da hélice aumentam gradativamente até a ruptura.
5. Com base nos resultados dos ensaios de tração, observou-se que tensão de ruptura da hélice diminui com o aumento da razão  $D/d$  (área da hélice). O mesmo foi observado experimentalmente em Nagata (2005) em areia compacta. De acordo com Perez et al. (2018) este fato ocorre porque a zona anelar de areia em torno da estaca perturbada pela instalação é maior em estaca com maior hélice. Sendo assim, as tensões normais atuantes na superfície cilíndrica de ruptura acima da hélice são menores para estaca de maior hélice (maior razão  $D/d$ ).
6. Com base na conclusão acima, foi ajustado nesta tese um método de previsão de capacidade de carga da hélice em tração em areia, que considera o efeito da razão  $D/d$  no coeficiente de empuxo na ruptura. O método apresentado mostrou boa concordância com os valores medidos.
7. Diferentemente da tensão ruptura da hélice em tração, a tensão de ruptura da hélice na compressão independe da razão  $D/d$ . Isto ocorre porque na compressão é mobilizado o solo intacto abaixo da hélice (não perturbado pela instalação, como o solo acima da hélice).
8. Os valores da razão tensão ruptura em tração/tensão ruptura em compressão da hélice diminuem com o aumento da hélice. Isto ocorre porque a tensão de ruptura da hélice na tração é prejudicada pelo efeito da instalação, o qual aumenta com o tamanho da hélice, enquanto que a tensão de ruptura da hélice na compressão não sofre este efeito de instalação.
9. Os valores de fator de torque adimensional relativo a hélice encontrados nesta pesquisa estão dentro da faixa encontrada na literatura, mostrada em Byrne e Houlsby (2015). Fato que indica que os resultados obtidos na câmara de calibração tem boa reprodutibilidade do comportamento *in situ* deste tipo de fundação.
10. Em relação aos valores de fator de torque adimensional (que varia de 5,0 e 14,4) mostrados na literatura sobre estacas helicoidais, acredita-se que é necessário a criação de outros tipos de parâmetros de controle mais útil na engenharia de fundações além do  $k_T$ , porque infelizmente a variação deste valor é muito grande.
11. Os resultados dos ensaios mostram que o fator de torque adimensional relativo a hélice tende a diminuir com o aumento da sobrecarga até uma certa profundidade, a partir da qual passa a ser constante. Esta observação indica que a partir de certa profundidade, a

taxa de acréscimo de capacidade de carga a tração e de torque de instalação é a mesma conforme a estaca avança no terreno.

12. O deslocamento após a prova de carga a tração variou de 14,1 a 34,4% do diâmetro da hélice, podendo implicar em deslocamentos elevados no caso de utilização de estacas helicoidais utilizadas tanto à tração quanto à compressão (torres autoportantes) em areias. No caso das hélices instaladas em solos tropicais estes deslocamentos podem ser ainda maiores. Por tanto, é necessário que se limite o deslocamento na tração caso seja utilizado estaca helicoidal em torres autoportantes.
13. Futuros estudos são necessários para a confirmação de todas as conclusões e tendências apresentadas acima.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

1. Realizar a instalação das estacas com hélices de passo de tamanhos diferentes do testado nesta tese, e comparar com os ensaios aqui mostrados, para verificar o efeito da instalação mudando o passo.
2. Realizar os ensaios desta tese na condição da areia saturada.
3. Realizar a instalação das estacas variando a velocidade de instalação para verificar a influência na capacidade de carga à tração.
4. Realizar ensaios em estacas modelo com duas hélices para o estudo do comportamento de estacas multi-hélices.
5. Realizar ensaios de carregamento cíclico axial em modelos de estacas helicoidais.
6. Realizar ensaios em modelo de areia intercalado com camadas de solo colorido para poder investigar a superfície de ruptura das estacas helicoidais e da zona anelar perturbada pelo efeito da instalação.
7. Realizar um estudo dos deslocamentos após a execução de ensaios de tração e compressão para determinar deslocamentos admissíveis na estaca helicoidal.
8. Realizar uma análise dimensional para que o trabalho pudesse ser extrapolado para outras dimensões (maiores ou menores).
9. Realizar modelagem numérica simulando a instalação e depois o carregamento da estaca helicoidal em ambientes 2D e 3D.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. B. CHANCE COMPANY (1994). **Helical pier foundations systems**. Technical Manual. Centralia, Bulletin 01-9601.

A. B. CHANCE COMPANY (2003). **Helical Screw Foundations Design Manual for New Construction**. Manufacturer Technical Support Document. Centralia.

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

AL-BAGHDADI, T. **Screw Piles as Offshore Foundations: Numerical and Physical Modelling**. PhD diss., University of Dundee, 2018.

ANNICCHINI, M. M. **O efeito da taxa de avanço no solo durante a instalação de estacas helicoidais na capacidade de carga, no torque e na força de instalação**. Qualificação de mestrado, São Carlos, 2020.

ARTHUR, J. R. F. & MENZINES, B. K. Inherent Anisotropy in a sand. **Geotechnique**, Vol. 22, No.1, 1972, pp. 115-128.

BAGHERI, F., and M. H. EL NAGGAR. 2015. Effects of Installation Disturbance on Behavior of Multi-Helix Piles in Structured Clays. **DFI Journal - the Journal of the Deep Foundations Institute**, vol. 9 (2): 80–91.

BELLOTTI, R., BIZZI, G. & GHIONNA, V. Design, construction, and use of a calibration chamber. **Proc. ESOPT II**, Balkema, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 2, 1982, pp. 439-446.

BRANDON, T.L. and CLOUGH, G.W. Methods of Sample Fabrication in the Virginia Tech Calibration Chamber. **Proceedings, 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing**. Clarkson University, June 1991.

BYRNE, B. W., and G. T. HOULSBY. Helical Piles: An Innovative Foundation Design Option for Offshore Wind Turbines. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 2015, 373 (2035).

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

CHOI, Y. S., LEE, J.; PREZZI M. & SALGADO, R. Response of Pile Groups Driven in Sand Subjected to Combined Loads. **Geotechnical and Geological Engineering**. Vol 35, No 4, 2017, p.p. 1587-1604.

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

DAS, B. M., and S. K. SHUKLA. **Earth Anchors**. 2nd ed. Florida, USA: J. Ross Publishing, Inc, 2013.

DAVIDSON, C., T. AL- BAGHDADI, M. BROWN, A. BRENNAN, J. KNAPPETT, C. AUGARDEE. Centrifuge Modelling of Screw Piles for Offshore Wind Energy Foundations. **In Proceedings of the International Conference on Physical Modelling in Geotechnics**. London. 2018. pp. 255–261.

GAVIN, K., DOHERTY, P.& TOLOOIYAN, A. Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol51, No 11, 2014, p.p. 1343-1354.

GHALY, A.M. & CLEMENCE, S.P. Pullout Performance of Inclined Helical Screw Anchors in Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 124, No. 7, 1998, pp. 617–627.

GHALY, A. M. & HANNA, A. Experimental and theoretical studies on installation torque of screw anchors. **Canadian geotechnical journal**, Vol28, No. 3, 1991, pp. 353-364.

GHALY, A. M., HANNA, A. & HANNA, M. Installation torque of screw anchors in sand. **Soils and Foundations**, Vol31, No. 2, 1991, pp. 77-92.

GHIONNA, V.& JAMILKOWSKI, M. “A critical Apraisal of Calibration Chamber Testing of Sands”, Proc., **1<sup>st</sup> Int. Symp. on Calibration Chamber Testing (ISOCCTI)**. Elsevier, Potsdam, New York, 1991,pp. 13-39.

HOLDEN, J. C. Laboratory Research on Static Cone Penetrometers. **Rep. No. CE-SM-7I-1**, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, 1971.



HOYT, R. M.& CLEMENCE, S. P. "Uplift capacity of helical anchors in soil", **Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering**. Rio de Janeiro, Brazil, Vol.2, 1989, pp. 1019-1022.

HUBBELL, Inc. **Chance Technical Design Manual**. 3rd ed. Shelton, CT: A. B. Chance, Hubbell, Inc, 2014.

JACOBSEN, M. On pluvial compaction of sand, Aalborg University, Institute of Civil Engineering, Laboratorret for Fundamentering, Denmark, **Report 9**, 1976.

JAPAN ROAD ASSOCIATION. **Pile Foundation Design Handbook**. Japan Road Association, 2007.

KANAI, S. A Seismic Retrofitting Application by Means of Multi-Helix Micro-Piles. **In: Proceedings of the 23<sup>th</sup> U. S. Japan Bridge Engineering Workshop**, Tsukuba, Japan, 2007.

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

KURIAN, N. P., and SHAH. J. Studies on the Behavior of Screw Piles by the Finite Element Method. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 36, No 6, 2009, pp. 627-638.

LADD, R. S. Specimen preparation and liquefaction of sands. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, Technical notes, Vol. 100, No. GT10, 1974, pp. 1180-1184.

LADD, R. S. Preparing Test Specimens Using Under compaction. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, Vol. 1, 1978, pp. 16-23.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, John Wiley and Sons, New York, 1969.

LEE, J.& SALGADO, R. Analysis of calibration chamber plate load tests. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 37, No 1, 2000, pp. 14-25.

LEE, K. L.& SEED, H. B. Drained strength characteristics of sands. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, Vol. 93, No SM6, 1967, pp. 117-141.

LIVNEH, B. & NAGGAR, M. H. Axial Testing and Numerical Modelling of Square Shaft Helical Piles Under Compressive and Tensile Loading. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 45, No. 8, 2008, pp. 1142-1155.

LO PRESTI, D.C.F., PEDRONI, S., CRIPPA, V. Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by **ASTM D 4285–83**: a comparative study *Geotech. Test. J.*,15 (2) (1992), pp. 180-189

LUTENEGGER, A. J., J. ERIKSON, and N. WILLIAM. Evaluating Installation Disturbance of Helical Anchors in Clay from Field Vane Tests. **In Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations**, 2014. pp. 129–138.

LUTENEGGER, A. J. e CLEMENCE, S. P. Screw Piles and Helical Anchors: 180 Years of Use in Geotechnical Engineering. **Geo-Strata—Geo Institute of ASCE**, Vol19, No. 1, 2015, pp. 40-44.

LUTENEGGER A. J. & TSUHA, C. H. C., Evaluating installation disturbance from helical piles and anchors using compression and tension tests. **In: Proceedings of the 15<sup>th</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Buenos Aires – Argentina, 2015.

MAHOMOOD, A.; MITCHELL, J. K. & LINDBLOM, U. Effect of Specimen Preparation Method on Grain Arrangement and compressibility in Sand, Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing. **ASTM STP 599**, 1976, pp. 169-192.

MALIK, A. A.; KUWANO, J.; TACHIBANA, S.& MAEJIMA, T. End Bearing Capacity Comparison of Screw Pile with Straight Pipe Pile under Similar Ground Conditions. **Acta Geotechnica**, Vol. 12, No.2, 2016, pp. 415-428.

MAYNE, P. W. & KULHAWY, F. H. Calibration Chamber Data Baseand Boundary Effects Correction for CPT Data, **Proc., 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Calibration Chamber Testing (ISOCCTI)**. Elsevier, Potsdam, New York, 1991, pp. 257-264.

MEYERHOF, G. G. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. **Geotechnique**, Vol. 2, No.4, 1951, pp. 301-331.

MEYERHOF, G. G. 1976. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. **Journal of the Geotechnical Engineering Division** 102 (GT3): 197–228.

MERIFIELD, R. S. Ultimate Uplift Capacity of Multiplate Helical Type Anchors in Clay **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 137, No.7, 2011, pp. 704-716.

MITSCH, M. P. AND CLEMENCE, S. P. The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand. **In Proceedings of Uplift behavior of anchor foundations in soil**. ASCE, Detroit, 1985, pp.26-47.

MIURA, S. & TOKI, S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. **Soil and Foundations**, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 22, No. 1, 1982, pp. 66-77.

MOONEY, J. S.; ADAMCZAK, J. R. AND CLEMENCE, S. P. Uplift capacity of helix anchors in clay and silt. **In Proceedings of Uplift behavior of anchor foundations in soil**, ASCE, Detroit, 1985, pp.48-72.

MULILIS, J. P.; CHAN, C. K. & SEED, H. B. “The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands”, **Report No. EERC 75-18**, University of California, 1975.

MULILIS, J. P.; SEED, H. B.; CHAN, C. K.; MITCHELL, J. K. & ARULANANDAN, K. Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, Vol. 103, No. GT2, 1977, pp. 91-108.

NAGAI, H.; TSUCHIYA, T.& SHIMADA, M. Influence of Installation Method on Performance of Screwed Pile and Evaluation of Pulling Resistance. **Soils and Foundations**, Vol. 58, No.2, 2018, pp.355-369.

NAGATA, M., and H. HIRATA. 2005. Study on the Uplift Resistance of Screwed Steel Pile. Nippon Steel. **Technical Report**, N 92: 73–78.

NARASIMHA RAO, S.; PRASSAD, M. D.; SHETTY, M. D.ANDJOSHI, V. V. Uplift Capacity of Screw Pile Anchors. **Geotechnical Engineering**, Vol. 20, No.2, 1989, pp.35-50.

NASR, M.H. Use of Large Capacity Screw Piles - High Pressure Grouted Piles – Barbados. **Proceedings of the Helical Foundations and Tie-Backs Seminar**, Deep Foundation Institute, New Orleans, 2007.

NBR 6508. **Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica**. ABNT. 1984.

NBR 6457. **Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. ABNT, 1986.

NBR 12131. **Estacas – provas de carga estática**. ABNT, 1992.

ODA, M. Initial Fabrics and Their Relations to Mechanical Properties of Granular Material. **Soils and Foundations**, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 12, No. 01, 1972, pp. 17-36.

ODA, M. The Mechanism of Fabric Changes During Compression Deformation of Sand. **Soils and Foundations**, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 12, No. 02, 1972, pp. 1-18.

ODA, M. & KOISHIKAWA, I. Strength Anisotropy of Sand Ground and Its Significance in Soil Engineering. **JSCE**, No. 273, 1978, pp. 111-120. Em Miura & Toki (1982)

ODA, M.; KONISHI, J. & NEMAT-NASSER. Some Experimentally Based Fundamental Results on the Mechanical Behavior of Granular Materials. **Geotechnique**, Vol. 30, No. 04, 1980, pp. 479-495.

OLIVEIRA FILHO, W. L. DE. **Considerações sobre Ensaios Triaxiais em Areias**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1987.

O'NEILL, M. W. Houston's calibration chamber: case histories. In: **Proceedings of the First International Symposium on Calibration Chamber Testing/ISOCCT1**. New York (USA). International Symposium on Calibration Chamber Testing, 1991, pp. 277-288.

PARKIN, A. & LUNNE, T. Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer in Sand. **Proc., 2<sup>nd</sup> Eur. Symp. On Penetration Testing**, Vol. 2, Balkema, Amsterdam, The Netherlands, 1982, 761-768.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**, São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PÉREZ, Z. A. **Análise numérica do efeito de instalação de ancoragens helicoidais em areia**. (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

PEREZ, Z. A., J. A. SCHIAVON, C. de HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA, D. DIAS, & L. THOREL. 2018. Numerical and Experimental Study on Influence of Installation Effects on Behaviour of Helical Anchors in Very Dense Sand. **Canadian Geotechnical Journal** 55 (8): 1067–1080.

PERKO, H. A. **Energy method for predicting the installation torque of helical foundation and anchors**. New technological and design developments in deep foundation technologies, ASCE, 2000, pp.342-352.

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

PLAXIS, B. V. **MANUAL PLAXIS 2D Version 8.2-Finite element code for soil and rock analysis**. AA Balkema, Delft, 2004.

RANDOLPH, M. F. (2003). Science and empiricism in pile foundation design. **Géotechnique**, 53(10), 847-875.

RAO, S. N., PRASAD, Y. V. S. N., & VEERESH, C. (1993). Behaviour of embedded model screw anchors in soft clays. **Geotechnique**, 43(4), 605-614.

SALGADO, R.; MITCHELL, J. K. and JAMIOLKOWSKI, M. Cavity Expansion and Penetration Resistance in Sands. **Journal Geotech. And Geoenviron. Engineering**, ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp.344-354.

SALGADO, R.; MITCHELL, J. K. and JAMIOLKOWSKI, M. Calibration Chamber size effects on penetration resistance in sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 124, No.9, 1998.

SANTOS FILHO, J. M. S. M. **Efeito de instalação de estacas helicoidais em solo tropical** (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

SANTOS FILHO, J.M.S.M., MORAIS T.D.S.O. & TSUA C.H.C. A new experimental procedure to investigate the torque correlation factor of helical anchors. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering** 19 (Bund. P): 3851–3864. 2014.

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

SAKR, M. 2009a. Performance of Helical Piles in Oil Sand. **Canadian Geotechnical Journal** 46 (9): 1046–1061.

SAKR, M. 2009b. Lateral resistance of helical monopole bases. **Canadian Geotechnical Society Conference**, Winnipeg, Manitoba.

SAKR, M. Installation torque of helical piles in cohesionless soils. **In: Proceedings of Canadian Geotechnical Conference**. GeoMontreal, Montreal. 2013.

SCHIAVON, J. A. **Behaviour of helical anchors subjected to cyclic loadings**. Ph.D. Thesis, University of São Paulo, São Carlos, 300p, 2016.

SHARIF, Y. U., M. J. BROWN, and M. O. CIANTIA. 2019. Numerically modelling the installation and loading of screw piles using DEM. **ISSPEA 2019**, 101.

SISSON, R. C. **Lateral Stresses on Displacement Penetrometers** PhD thesis, University of California, Berkeley, 1990.

SPAGNOLI, G., C. de HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA, P. ORESTE, & C. M. MENDEZ SOLARTE. 2019. A Sensitivity Analysis on the Parameters Affecting Large Diameter Helical Pile Installation Torque, Depth and Installation Power for Offshore Applications. **DFI Journal**. 171–185.

SPAGNOLI, G. and C. de HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA (2020) A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system, **Marine Georesources & Geotechnology**.

STEPHENSON, R. W. **Helical foundations and tie backs** (Course Notes). University of Missouri-Rolla, 2002.

SWEENEY, B. P. and CLOUGH, G. W. Design of a Large Calibration Chamber, **Geotechnical Testing Journal**, GTJODJ, Vol. 13, No 1, 1990, pp.36-44.

TATSUOKA, F.; IWASAKI, T. YOSHIDA, S.; FUKUSHIMA, S. & SUDO, H. Shear Modulus and Damping by Drained Tests on Clean Sand Specimens Reconstituted by Various Methods. **Soils and Foundations**, Proceedings, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 19, No. 1, 1979, pp. 39-54.

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

TROFIMENKOV, J. G. AND MARIUPOLSKII, L.G. Screw piles used for mast and tower foundations. **Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering**. Montreal, Vol. 2, 1965, pp. 328-332.

TSENG, D. J. **Prediction of Cone Penetration Resistance and Its Application to Liquefaction Assessment**. PhD thesis, University of California, Berkeley, 1989.

TSUCHIYA, T.; NAKAZAWA, F. AND SHIMADA, M. Study on penetration mechanism of screw pile based on soil movement around helical wing. **Journal of Architecture and Building Science**, No.25,2007, pp.73-76 (In Japanese).

TSUHA, C. H. C. **Modelo teórico para controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso.** (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

TSUHA, C. H. C. AND AOKI, N. Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 47, No.6, 2010, pp.623-647.

TSUHA, C. D. H. C., P. Y. FORAY, R. J. JARDINE, Z. X. YANG, M. SILVA, and S. RIMOY. 2012. Behaviour of Displacement Piles in Sand under Cyclic Axial Loading. **Soils and Foundations** 52 (3): 393–410.

TSUHA C. D. H. C., J. M. S. M. dos SANTOS FILHO, and T. D. C. SANTOS. Helical Piles in Unsaturated Structured Soil: A Case Study. **Canadian Geotechnical Journal**, 2016. Vol. 53 (1): 103–117.

UDWARI, J.J.; RODGERS, T.D.&SINGH,H. A Rational Approach to the Design of High Capacity Multi-Helix Screw Anchors. **Proceedings of the 7th Annual IEEE/PES, Transmission and Distribution Exposition, Piscataway.** NJ: IEEE Publishing,1979, pp. 606–610.

VAID, Y. P. & NEGUSSEY, D. Relative density of pluviated sand samples. **Soils and Foundations**, Vol24, No. 2, 1984, pp. 101-105.

VESIC, A. S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. **Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 98(3), 1972, pp. 265-290.

WEECH, C., and J. A. HOWIE. 2001. Helical Piles in Soft Sensitive Soil –Disturbance Effects During Pile Installation. **Proc 54th Canadian Geotechnical Conference.** Calgary, Alberta, 281–288.

WEIKART, A.M. and CLEMENCE, S.P. Helix Anchor Foundations - Two Case Histories. **Foundations for Transmission Line Towers**, American Society for Civil Engineers, 1987, pp. 72–80.

## APÊNDICE A – Procedimento para aplicação dos extensômetros

Segundo Takeya, T (2014), a maioria dos problemas de mau funcionamento são decorrentes da preparação, fixação e proteção executadas de maneira incorreta. Pensando nisto, esse procedimento de aplicação dos extensômetros foi feito para auxílio de futuras pesquisas realizadas no grupo de fundações da EESC.

No momento da fabricação foi feito um furo de 2mm para passar os fios da calibração e “afundou” 2 mm da estaca conforme mostra a figura 01.

Figura 01: Afundamento da superfície e furo para a colagem dos extensômetros.



Fonte: Autor.

Para uma melhor abordagem do passo a passo, foi dividido em 3 partes o processo de colagem dos extensômetros: (1) Preparação da Superfície onde será fixado o extensômetro; (2) Fixação dos extensômetros e (3) Impermeabilização e proteção dos extensômetros, conforme será descrito a seguir.

### (1) Preparação da Superfície onde será fixado o extensômetro:

Preparar a superfície significa deixá-la plana e uniforme, ou seja, isenta de saliências e reentrâncias. No caso das estacas metálicas, por elas já estarem lisas e com o rebaixamento de 2 mm, foi usado a lixas de nº 60 para retirar algumas marcas de “ferrugem” e que no final não fique polida. Após isto, foi utilizada a lixa Nº 120 aplicada em movimentos circulares, de



maneira a se obter na superfície riscos desordenados dos grãos da lixa. A figura 2 mostra o acabamento final após utilizada a lixa nº120. Em seguida, marcamos nas bordas da superfície lixada com caneta tipo “marca texto” para orientar o posicionamento correto do extensômetro, com riscos ortogonais que indicam a direção e a posição dos extensômetros.

Por último, limpou-se a superfície lixada para remover os resíduos da lixa e também o suor deixado pelo contato das mãos. Foi utilizado gaze embebida em álcool Isopropílico 99,8% (Não é recomendada a utilização de algodão porque pode deixar fiapos no local).

Figura 02: Afundamento da superfície e furo para a colagem dos extensômetros.



Fonte: Autor.

A figura 3 mostra como fica suja a gaze pós plicar na superfície a ser colado os extensômetros. Só parávamos com o processo da limpeza, após a gaze estar totalmente branca, ou seja, sem nenhum sinal de sujeira. A aplicação da limpeza com a gaze sempre era feito num sentido, de modo que, não espalhasse a sujeira na superfície onde foi colado os extensômetros.

Figura 03: Limpeza da superfície com álcool Isopropílico.



Fonte: Autor.

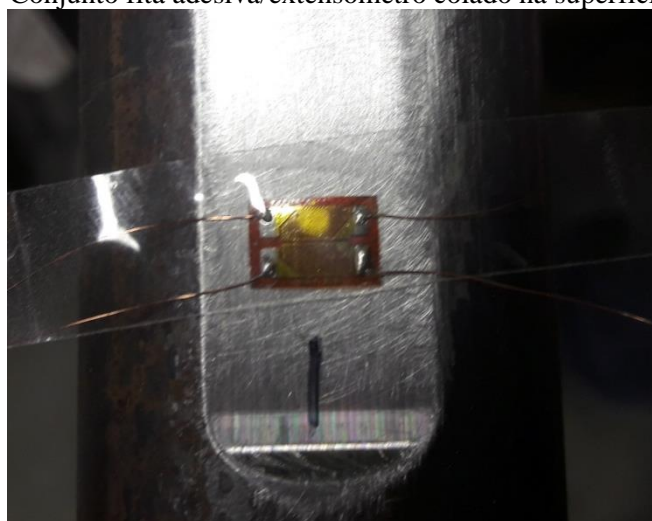
(2) Fixação do extensômetro:

O adesivo escolhido para a colagem foi o SuperBonder da LOCTITE, por causa da sua praticidade. É um adesivo à base de cianoacrilato, de um componente, em que a reação química ocorre instantaneamente em contato com o ar. O endurecimento ocorre em questões de segundos e com 15 minutos atinge-se 50% da cura. A fixação do extensômetro na posição correta é um operação delicada e exige muita habilidade, pois não se deve tocar com as mãos nuas o extensômetro e ne a superfície onde será fixado os extensômetros. A seguir, mostra-se a técnica utilizada na colagem.

**Passo 1:** Retirar cuidadosamente o extensômetro da embalagem, colocar sobre um placa de vidro limpa na posição normal de fixação e aplicar sobre o extensômetro um pedaço de fita adesiva (Durex) transparente fixando-o na placa de vidro. Levantar cuidadosamente a fita adesiva por uma de suas extremidades, o extensômetro ficará aderido a fita.

**Passo 2:** Aplicar o conjunto fita adesiva/extensômetro na superfície da estaca que já estava preparada, marcada e limpa, procurando alinhar as marcas existentes no extensômetro com as marcas feitas na superfície. Caso, o extensômetro não ficar na posição correta, pode-se remover o conjunto cuidadosamente e fazer outra tentativa, até que se obtenha o posicionamento correto. A figura 04 mostra o conjunto colado na estaca na posição correta.

Figura 04: Conjunto fita adesiva/extensômetro colado na superfície da estaca.



Fonte: Autor.

**Passo 3:** Estando o extensômetro corretamente posicionado, levantar cuidadosamente a fita adesiva por uma de suas extremidades até expor a face do extensômetro da fita adesiva colada na peça.

**Passo 4:** Aplicar o SuperBonder na superfície da peça conforme mostra a figura 05.

Figura 05: Aplicação do SuperBonder.



Fonte: Autor.

**Passo 5:** Retornar cuidadosamente a fita adesiva na posição de colagem, pressionando o conjunto fita adesiva/extensômetro, a partir da extremidade da fita adesiva que ficou colada na estaca, procurando expulsar o excesso de adesivo e as bolhas de ar. Os passos 4 e 5 devem ser feitos rapidamente porque o endurecimento do SuperBonder ocorre em questão de segundos.

**Passo 6:** Aplicar a pressão do dedo sobre o extensômetro por uns 2 minutos, conforme mostra a figura 06.

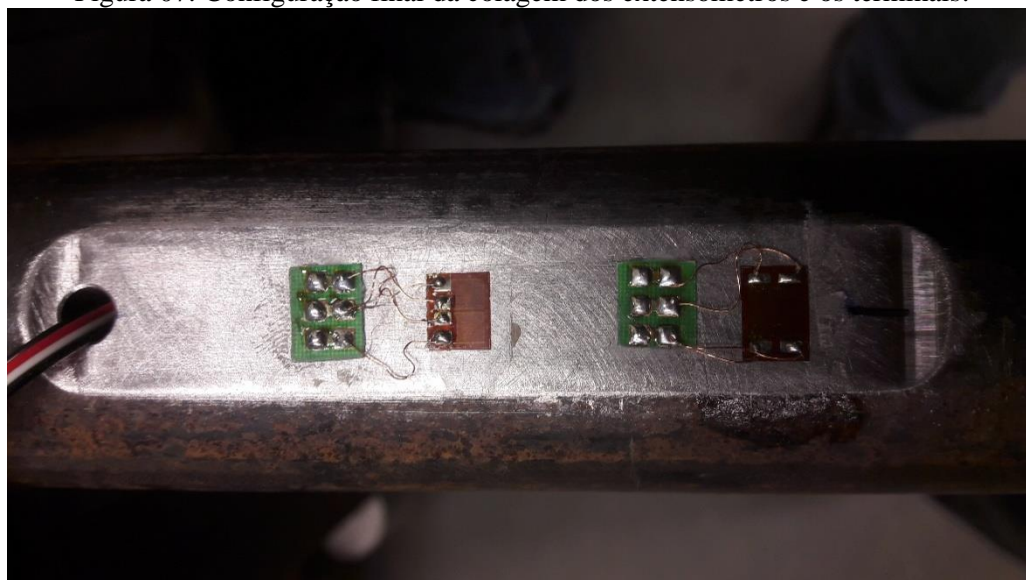
Figura 06: Aplicação de uma pressão com o dedo.



Fonte: Autor.

**Passo 7:** Esperar no mínimo 2 minutos e então remover cuidadosamente a fita adesiva por uma de suas extremidades. Caso o extensômetro não saia junto com a fita adesiva, a colagem está aprovada. A figura 07 mostra a colagem final dos extensômetros junto com os terminais para ligação dos fios.

Figura 07: Configuração final da colagem dos extensômetros e os terminais.

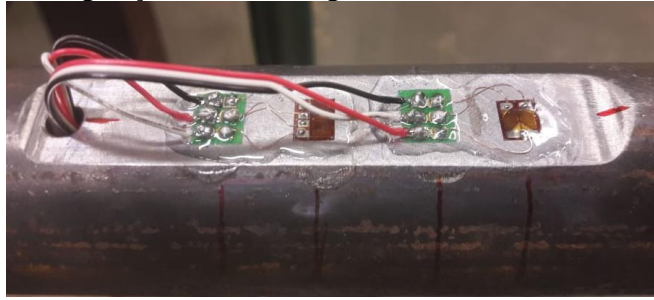


Fonte: Autor.

### (3) Impermeabilização e proteção do extensômetro:

Para a impermeabilização do extensômetro foi utilizado resina de silicone para proteger contra umidade do ar, de modo a não danificar o extensômetro e as conexões elétricas. A figura 08 mostra a configuração final da colagem já com a resina de silicone.

Figura 08: Configuração final da colagem dos extensômetros e os terminais.



Fonte: Autor.

## APÊNDICE B – Calibração da chuva de areia no laboratório

As características do cilindro utilizado nos ensaios da chuva de areia estão na tabela 01, a seguir.

Tabela 1: Informações sobre o cilindro.

Características	Dimensões
Peso do cilindro [g]	3574
Diâmetro do cilindro [cm]	10,14
Altura do cilindro [cm]	12,70
Volume do cilindro [cm <sup>3</sup> ]	1025,58

Fonte: Autor.

Dessa forma, foi possível fazer os ensaios variando as alturas e a abertura do bocal do funil, conforme dados das Tabelas 2 a 51. Sendo: H, a altura do bocal do funil até a peneira superior; h, a altura da peneira inferior até a base do cilindro; d, o diâmetro da abertura do bocal do funil.

2.1 *Ensaaios com a altura do Funil até a peneira superior igual a 30 cm (H=30 cm)*

Tabela 2: Dados obtidos para H=30 cm, h=40 cm e d = 5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5338	1764	1,720	16,873	16min39s
2	5334	1760	1,716	16,835	14min59s
3	5346	1772	1,728	16,950	14min36s
4	5348	1774	1,730	16,969	16min49s
5	5338	1764	1,720	16,873	13min11s
6	5338	1764	1,720	16,873	15min50s
7	5330	1756	1,712	16,797	14min05s
8	5328	1754	1,710	16,778	15min10s
9	5332	1758	1,714	16,816	15min50s
10	5336	1762	1,718	16,854	16min10s
Média	5336,8	1762,8	1,719	16,862	15min20s

Fonte: Autor.

Tabela 3: Dados obtidos para H=30 cm, h=40 cm e d = 10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5296	1722	1,679	16,471	1min29s
2	5302	1728	1,685	16,529	1min28s
3	5306	1732	1,689	16,567	1min24s
4	5310	1736	1,693	16,605	1min26s
5	5292	1718	1,675	16,433	1min28s
6	5292	1718	1,675	16,433	1min30s
7	5292	1718	1,675	16,433	1min29s
8	5298	1724	1,681	16,491	1min27s
9	5294	1720	1,677	16,452	1min26s
10	5298	1724	1,681	16,491	1min27s
Média	5298	1724	1,681	16,491	1min27s

Fonte: Autor.



Tabela 4: Dados obtidos para H=30 cm, h=40 cm e d = 15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5224	1650	1,609	15,783	28
2	5218	1644	1,603	15,725	29
3	5224	1650	1,609	15,783	28
4	5232	1658	1,617	15,859	28
5	5222	1648	1,607	15,764	29
6	5234	1660	1,619	15,878	28
7	5220	1646	1,605	15,745	28
8	5234	1660	1,619	15,878	27
9	5228	1654	1,613	15,821	28
10	5226	1652	1,611	15,802	28
Média	5226,2	1652,2	1,611	15,804	28

Fonte: Autor.

Tabela 5: Dados obtidos para H=30 cm, h=40 cm e d = 20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5130	1556	1,517	14,884	13
2	5134	1560	1,521	14,922	14
3	5124	1550	1,511	14,826	14
4	5128	1554	1,515	14,865	13
5	5128	1554	1,515	14,865	14
6	5130	1556	1,517	14,884	13
7	5132	1558	1,519	14,903	14
8	5126	1552	1,513	14,845	13
9	5128	1554	1,515	14,865	14
10	5134	1560	1,521	14,922	14
Média	5129,4	1555,4	1,517	14,878	14

Fonte: Autor.

Tabela 6: Dados obtidos para H=30 cm, h=40 cm e d = 25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5074	1500	1,463	14,348	8
2	5094	1520	1,482	14,539	8
3	5096	1522	1,484	14,558	8
4	5090	1516	1,478	14,501	8
5	5094	1520	1,482	14,539	8
6	5088	1514	1,476	14,482	7
7	5088	1514	1,476	14,482	9
8	5082	1508	1,470	14,425	8
9	5086	1512	1,474	14,463	8
10	5078	1504	1,466	14,386	9
Média	5087	1513	1,475	14,472	8

Fonte: Autor.

Tabela 7: Dados obtidos para H=30 cm, h=60 cm e d = 5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5326	1752	1,708	16,758	14min25s
2	5334	1760	1,716	16,835	18min57s
3	5336	1762	1,718	16,854	18min51s
4	5330	1756	1,712	16,797	14min52s
5	5328	1754	1,710	16,778	14min39s
6	5328	1754	1,710	16,778	15min57s
7	5338	1764	1,720	16,873	14min23s
8	5326	1752	1,708	16,758	18min06s
9	5342	1768	1,724	16,911	13min36s
10	5340	1766	1,722	16,892	12min52s
<b>Média</b>	<b>5332,8</b>	<b>1758,8</b>	<b>1,715</b>	<b>16,823</b>	<b>15min40s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 8: Dados obtidos para H=30 cm, h=60 cm e d = 10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5314	1740	1,697	16,644	1min25s
2	5318	1744	1,701	16,682	1min32s
3	5306	1732	1,689	16,567	1min32s
4	5298	1724	1,681	16,491	1min47s
5	5304	1730	1,687	16,548	1min36s
6	5312	1738	1,695	16,625	1min31s
7	5314	1740	1,697	16,644	1min30s
8	5302	1728	1,685	16,529	1min35s
9	5312	1738	1,695	16,625	1min29s
10	5312	1738	1,695	16,625	1min30s
Média	5309,2	1735,2	1,692	16,598	1min30s

Fonte: Própria.

Tabela 9: Dados obtidos para H=30 cm, h=60 cm e d = 15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5228	1654	1,613	15,821	27
2	5224	1650	1,609	15,783	26
3	5226	1652	1,611	15,802	26
4	5226	1652	1,611	15,802	23
5	5230	1656	1,615	15,840	27
6	5216	1642	1,601	15,706	27
7	5220	1646	1,605	15,745	26
8	5226	1652	1,611	15,802	26
9	5224	1650	1,609	15,783	27
10	5236	1662	1,621	15,898	25
<b>Média</b>	<b>5225,6</b>	<b>1651,6</b>	<b>1,610</b>	<b>15,798</b>	<b>26</b>

Fonte: Autor.

Tabela 10: Dados obtidos para H=30 cm, h=60 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5142	1568	1,529	14,998	14
2	5138	1564	1,525	14,960	13
3	5130	1556	1,517	14,884	13
4	5142	1568	1,529	14,998	14
5	5142	1568	1,529	14,998	13
6	5140	1566	1,527	14,979	14
7	5138	1564	1,525	14,960	13
8	5138	1564	1,525	14,960	14
9	5126	1552	1,513	14,845	14
10	5126	1552	1,513	14,845	14
Média	5136,2	1562,2	1,523	14,943	14

Fonte: Autor.

Tabela 11: Dados obtidos para H=30 cm, h=60 cm e d = 25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5088	1514	1,476	14,482	7
2	5086	1512	1,474	14,463	7
3	5092	1518	1,480	14,520	7
4	5094	1520	1,482	14,539	7
5	5088	1514	1,476	14,482	7
6	5088	1514	1,476	14,482	8
7	5098	1524	1,486	14,578	8
8	5104	1530	1,492	14,635	8
9	5096	1522	1,484	14,558	8
10	5082	1508	1,470	14,425	8
Média	5091,6	1517,6	1,480	14,516	8

Fonte: Autor.



2.2 Ensaaios com a altura do Funil até a peneira superior igual a 40 cm ( $H=40$  cm).

Tabela 12: Dados obtidos para  $H=40$  cm,  $h=40$  cm e  $d=5$  mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5318	1744	1,701	16,682	16min51s
2	5314	1740	1,697	16,644	17min58s
3	5334	1760	1,716	16,835	17min32s
4	5330	1756	1,712	16,797	17min38s
5	5332	1758	1,714	16,816	18min12s
6	5320	1746	1,702	16,701	17min54s
7	5330	1756	1,712	16,797	18min50s
8	5336	1762	1,718	16,854	19min10s
9	5334	1760	1,716	16,835	17min15s
10	5332	1758	1,714	16,816	19min27s
Média	5328	1754	1,710	16,778	18min05s

Fonte: Autor.

Tabela 13: Dados obtidos para H=40 cm, h=40 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5312	1738	1,695	16,625	1min41s
2	5312	1738	1,695	16,625	1min35s
3	5296	1722	1,679	16,471	1min38s
4	5294	1720	1,677	16,452	1min55s
5	5298	1724	1,681	16,491	1min43s
6	5302	1728	1,685	16,529	1min41s
7	5284	1710	1,667	16,357	1min55s
8	5314	1740	1,697	16,644	2min07s
9	5306	1732	1,689	16,567	2min06s
10	5296	1722	1,679	16,471	1min41s
Média	5301,4	1727,4	1,684	16,523	1min48s

Fonte: Autor.

Tabela 14: Dados obtidos para H=40 cm, h=40 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5272	1698	1,656	16,242	32
2	5264	1690	1,648	16,165	32
3	5264	1690	1,648	16,165	31
4	5260	1686	1,644	16,127	30
5	5268	1694	1,652	16,204	32
6	5270	1696	1,654	16,223	31
7	5268	1694	1,652	16,204	30
8	5256	1682	1,640	16,089	29
9	5258	1684	1,642	16,108	30
10	5260	1686	1,644	16,127	29
<b>Média</b>	<b>5264</b>	<b>1690</b>	<b>1,648</b>	<b>16,165</b>	<b>31</b>

Fonte: Autor.

Tabela 15: Dados obtidos para H=40 cm, h=40 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5160	1586	1,546	15,171	16
2	5148	1574	1,535	15,056	14
3	5152	1578	1,539	15,094	15
4	5144	1570	1,531	15,018	15
5	5152	1578	1,539	15,094	14
6	5150	1576	1,537	15,075	14
7	5150	1576	1,537	15,075	15
8	5146	1572	1,533	15,037	15
9	5144	1570	1,531	15,018	15
10	5152	1578	1,539	15,094	14
Média	5149,8	1575,8	1,536	15,073	15

Fonte: Autor.

Tabela 16: Dados obtidos para H=40 cm, h=40 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5092	1518	1,480	14,520	8
2	5094	1520	1,482	14,539	10
3	5092	1518	1,480	14,520	9
4	5088	1514	1,476	14,482	9
5	5098	1524	1,486	14,578	9
6	5100	1526	1,488	14,597	9
7	5102	1528	1,490	14,616	9
8	5094	1520	1,482	14,539	10
9	5094	1520	1,482	14,539	9
10	5100	1526	1,488	14,597	10
Média	5095,4	1521,4	1,483	14,553	9

Fonte: Autor.

Tabela 17: Dados obtidos para H=40 cm, h=60 cm e d=5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5340	1766	1,722	16,892	19min33s
2	5326	1752	1,708	16,758	19min59s
3	5334	1760	1,716	16,835	17min24s
4	5332	1758	1,714	16,816	17min31s
5	5336	1762	1,718	16,854	21min47s
6	5334	1760	1,716	16,835	20min23s
7	5330	1756	1,712	16,797	21min45s
8	5338	1764	1,720	16,873	20min10s
9	5336	1762	1,718	16,854	20min46s
10	5328	1754	1,710	16,778	20min27s
Média	5333,4	1759,4	1,716	16,829	19min58s

Fonte: Autor.

Tabela 18: Dados obtidos para H=40 cm, h=60 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5316	1742	1,699	16,663	1min45s
2	5310	1736	1,693	16,605	1min44s
3	5310	1736	1,693	16,605	1min45s
4	5312	1738	1,695	16,625	1min47s
5	5328	1754	1,710	16,778	1min42s
6	5314	1740	1,697	16,644	1min34s
7	5310	1736	1,693	16,605	1min35s
8	5300	1726	1,683	16,510	1min38s
9	5324	1750	1,706	16,739	1min45s
10	5322	1748	1,704	16,720	1min39s
Média	5314,6	1740,6	1,697	16,649	1min41s

Fonte: Autor.

Tabela 19: Dados obtidos para H=40 cm, h=60 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5238	1664	1,622	15,917	27
2	5234	1660	1,619	15,878	27
3	5236	1662	1,621	15,898	27
4	5234	1660	1,619	15,878	27
5	5222	1648	1,607	15,764	28
6	5236	1662	1,621	15,898	26
7	5228	1654	1,613	15,821	28
8	5236	1662	1,621	15,898	27
9	5234	1660	1,619	15,878	27
10	5232	1658	1,617	15,859	28
Média	5233	1659	1,618	15,869	27

Fonte: Autor.



Tabela 20: Dados obtidos para H=40 cm, h=60 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5158	1584	1,544	15,151	14
2	5134	1560	1,521	14,922	15
3	5148	1574	1,535	15,056	15
4	5152	1578	1,539	15,094	15
5	5158	1584	1,544	15,151	15
6	5142	1568	1,529	14,998	15
7	5150	1576	1,537	15,075	15
8	5152	1578	1,539	15,094	15
9	5134	1560	1,521	14,922	15
10	5154	1580	1,541	15,113	15
Média	5148,2	1574,2	1,535	15,058	15

Fonte: Autor.

Tabela 21: Dados obtidos para H=40 cm, h=60 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5108	1534	1,496	14,673	8
2	5108	1534	1,496	14,673	8
3	5106	1532	1,494	14,654	8
4	5106	1532	1,494	14,654	8
5	5108	1534	1,496	14,673	8
6	5106	1532	1,494	14,654	9
7	5108	1534	1,496	14,673	9
8	5108	1534	1,496	14,673	9
9	5112	1538	1,500	14,711	9
10	5102	1528	1,490	14,616	9
Média	5107,2	1533,2	1,495	14,666	9

Fonte: Autor.

2.3 Ensaio com a altura do Funil até a peneira superior igual a 50 cm ( $H=50$  cm).

Tabela 22: Dados obtidos para  $H=50$  cm,  $h=40$  cm e  $d=5$  mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5340	1766	1,722	16,892	15min35s
2	5348	1774	1,730	16,969	17min02s
3	5346	1772	1,728	16,950	17min10s
4	5344	1770	1,726	16,931	17min08s
5	5350	1776	1,732	16,988	16min58s
6	5348	1774	1,730	16,969	18min45s
7	5346	1772	1,728	16,950	15min45s
8	5338	1764	1,720	16,873	15min07s
9	5342	1768	1,724	16,911	16min37s
10	5336	1762	1,718	16,854	21min36s
<b>Média</b>	<b>5343,8</b>	<b>1769,8</b>	<b>1,726</b>	<b>16,929</b>	<b>17min06s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 23: Dados obtidos para H=50 cm, h=40 cm e d=10 mm

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5336	1762	1,718	16,854	1min46s
2	5322	1748	1,704	16,720	1min38s
3	5332	1758	1,714	16,816	1min47s
4	5320	1746	1,702	16,701	1min45s
5	5328	1754	1,710	16,778	1min49s
6	5326	1752	1,708	16,758	1min44s
7	5322	1748	1,704	16,720	1min46s
8	5318	1744	1,701	16,682	1min43s
9	5324	1750	1,706	16,739	1min46s
10	5324	1750	1,706	16,739	1min43s
<b>Média</b>	<b>5325,2</b>	<b>1751,2</b>	<b>1,708</b>	<b>16,751</b>	<b>1min41s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 24: Dados obtidos para H=50 cm, h=40 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5266	1692	1,650	16,185	35
2	5252	1678	1,636	16,051	35
3	5256	1682	1,640	16,089	31
4	5274	1700	1,658	16,261	32
5	5256	1682	1,640	16,089	31
6	5282	1708	1,665	16,338	33
7	5264	1690	1,648	16,165	32
8	5268	1694	1,652	16,204	31
9	5260	1686	1,644	16,127	30
10	5276	1702	1,660	16,280	30
<b>Média</b>	<b>5265,4</b>	<b>1691,4</b>	<b>1,649</b>	<b>16,179</b>	<b>32</b>

Fonte: Autor.

Tabela 25: Dados obtidos para H=50 cm, h=40 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5178	1604	1,564	15,343	16
2	5188	1614	1,574	15,438	16
3	5172	1598	1,558	15,285	17
4	5172	1598	1,558	15,285	16
5	5156	1582	1,543	15,132	16
6	5174	1600	1,560	15,305	16
7	5170	1596	1,556	15,266	17
8	5184	1610	1,570	15,400	16
9	5178	1604	1,564	15,343	17
10	5172	1598	1,558	15,285	16
Média	5174,4	1600,4	1,560	15,308	16

Fonte: Autor.

Tabela 26: Dados obtidos para H=50 cm, h=40 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5116	1542	1,504	14,750	10
2	5130	1556	1,517	14,884	10
3	5126	1552	1,513	14,845	10
4	5126	1552	1,513	14,845	11
5	5124	1550	1,511	14,826	10
6	5116	1542	1,504	14,750	9
7	5120	1546	1,507	14,788	11
8	5114	1540	1,502	14,731	9
9	5122	1548	1,509	14,807	10
10	5128	1554	1,515	14,865	10
Média	5122,2	1548,2	1,510	14,809	10

Fonte: Autor.

Tabela 27: Dados obtidos para H=50 cm, h=60 cm e d=5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5342	1768	1,724	16,911	18min56s
2	5334	1760	1,716	16,835	23min13s
3	5340	1766	1,722	16,892	21min05s
4	5336	1762	1,718	16,854	22min10s
5	5342	1768	1,724	16,911	19min24s
6	5336	1762	1,718	16,854	23min48s
7	5338	1764	1,720	16,873	22min37s
8	5346	1772	1,728	16,950	23min30s
9	5340	1766	1,722	16,892	22min15s
10	5338	1764	1,720	16,873	23min04s
<b>Média</b>	<b>5339,2</b>	<b>1765,2</b>	<b>1,721</b>	<b>16,885</b>	<b>22min</b>

Fonte: Autor.



Tabela 28: Dados obtidos para H=50 cm, h=60 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5326	1752	1,708	16,758	2min49s
2	5324	1750	1,706	16,739	2min52s
3	5326	1752	1,708	16,758	2min44s
4	5320	1746	1,702	16,701	2min11s
5	5320	1746	1,702	16,701	2min23s
6	5322	1748	1,704	16,720	2min19s
7	5328	1754	1,710	16,778	2min25s
8	5326	1752	1,708	16,758	2min28s
9	5322	1748	1,704	16,720	2min24s
10	5318	1744	1,701	16,682	2min44s
<b>Média</b>	<b>5323,2</b>	<b>1749,2</b>	<b>1,706</b>	<b>16,732</b>	<b>2min30s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 29: Dados obtidos para H=50 cm, h=60 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5268	1694	1,652	16,204	28
2	5266	1692	1,650	16,185	29
3	5254	1680	1,638	16,070	29
4	5250	1676	1,634	16,031	29
5	5268	1694	1,652	16,204	28
6	5270	1696	1,654	16,223	28
7	5258	1684	1,642	16,108	29
8	5264	1690	1,648	16,165	29
9	5266	1692	1,650	16,185	28
10	5254	1680	1,638	16,070	28
<b>Média</b>	<b>5261,8</b>	<b>1687,8</b>	<b>1,646</b>	<b>16,144</b>	<b>29</b>

Fonte: Autor.

Tabela 30: Dados obtidos para H=50 cm, h=60 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5194	1620	1,580	15,496	15
2	5198	1624	1,583	15,534	15
3	5192	1618	1,578	15,477	15
4	5194	1620	1,580	15,496	16
5	5188	1614	1,574	15,438	16
6	5198	1624	1,583	15,534	16
7	5194	1620	1,580	15,496	15
8	5190	1616	1,576	15,458	15
9	5196	1622	1,582	15,515	15
10	5206	1632	1,591	15,611	16
<b>Média</b>	<b>5195</b>	<b>1621</b>	<b>1,581</b>	<b>15,505</b>	<b>15</b>

Fonte: Autor.

Tabela 31: Dados obtidos para H=50 cm, h=60 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5124	1550	1,511	14,826	9
2	5128	1554	1,515	14,865	9
3	5122	1548	1,509	14,807	10
4	5132	1558	1,519	14,903	9
5	5128	1554	1,515	14,865	9
6	5120	1546	1,507	14,788	9
7	5126	1552	1,513	14,845	10
8	5124	1550	1,511	14,826	10
9	5130	1556	1,517	14,884	9
10	5122	1548	1,509	14,807	9
Média	5125,6	1551,6	1,513	14,842	9

Fonte: Autor.

2.4 Ensaio com a altura do Funil até a peneira superior igual a 60 cm ( $H=60$  cm).

Tabela 32: Dados obtidos para  $H=60$  cm,  $h=40$  cm e  $d=5$  mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5348	1774	1,730	16,969	17min17s
2	5338	1764	1,720	16,873	15min55s
3	5344	1770	1,726	16,931	13min02s
4	5350	1776	1,732	16,988	19min20s
5	5352	1778	1,734	17,007	20min02s
6	5350	1776	1,732	16,988	20min15s
7	5352	1778	1,734	17,007	18min06s
8	5346	1772	1,728	16,950	17min03s
9	5348	1774	1,730	16,969	17min52s
10	5342	1768	1,724	16,911	19min37s
Média	5347	1773	1,729	16,959	17min51s

Fonte: Autor.

Tabela 33 Dados obtidos para H=60 cm, h=40 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5342	1768	1,724	16,911	1min55s
2	5340	1766	1,722	16,892	1min59s
3	5342	1768	1,724	16,911	2min01s
4	5346	1772	1,728	16,950	2min00s
5	5342	1768	1,724	16,911	2min01s
6	5344	1770	1,726	16,931	2min02s
7	5336	1762	1,718	16,854	1min59s
8	5338	1764	1,720	16,873	1min58s
9	5344	1770	1,726	16,931	2min00s
10	5342	1768	1,724	16,911	2min01s
<b>Média</b>	<b>5341,6</b>	<b>1767,6</b>	<b>1,724</b>	<b>16,908</b>	<b>2min</b>

Fonte: Autor.

Tabela 34: Dados obtidos para H=60 cm, h=40 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5312	1738	1,695	16,625	34
2	5292	1718	1,675	16,433	33
3	5288	1714	1,671	16,395	37
4	5290	1716	1,673	16,414	37
5	5294	1720	1,677	16,452	37
6	5296	1722	1,679	16,471	37
7	5292	1718	1,675	16,433	35
8	5290	1716	1,673	16,414	36
9	5298	1724	1,681	16,491	38
10	5294	1720	1,677	16,452	37
<b>Média</b>	<b>5294,6</b>	<b>1720,6</b>	<b>1,678</b>	<b>16,458</b>	<b>36</b>

Fonte: Autor.

Tabela 35: Dados obtidos para H=60 cm, h=40 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5212	1638	1,597	15,668	17
2	5208	1634	1,593	15,630	17
3	5200	1626	1,585	15,553	18
4	5196	1622	1,582	15,515	18
5	5188	1614	1,574	15,438	18
6	5212	1638	1,597	15,668	18
7	5210	1636	1,595	15,649	17
8	5198	1624	1,583	15,534	17
9	5196	1622	1,582	15,515	17
10	5206	1632	1,591	15,611	18
<b>Média</b>	<b>5202,6</b>	<b>1628,6</b>	<b>1,588</b>	<b>15,578</b>	<b>18</b>

Fonte: Autor.



Tabela 36: Dados obtidos para H=60 cm, h=40 cm e d=25 mm.

Corpos de prova	Massa total [g]	Massa da areia [g]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Peso Específico [kN/m <sup>3</sup> ]	Tempo [s]
1	5134	1560	1,521	14,922	11
2	5158	1584	1,544	15,151	11
3	5146	1572	1,533	15,037	11
4	5152	1578	1,539	15,094	11
5	5154	1580	1,541	15,113	10
6	5154	1580	1,541	15,113	11
7	5154	1580	1,541	15,113	11
8	5164	1590	1,550	15,209	10
9	5158	1584	1,544	15,151	11
10	5154	1580	1,541	15,113	11
Média	5152,8	1578,8	1,539	15,102	11

Fonte: Autor.

Tabela 37: Dados obtidos para H=60 cm, h=60 cm e d=5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5344	1770	1,726	16,931	21min12s
2	5342	1768	1,724	16,911	22min30s
3	5346	1772	1,728	16,950	18min43s
4	5346	1772	1,728	16,950	19min02s
5	5348	1774	1,730	16,969	20min25s
6	5344	1770	1,726	16,931	21min13s
7	5348	1774	1,730	16,969	20min35s
8	5350	1776	1,732	16,988	21min29s
9	5348	1774	1,730	16,969	22min10s
10	5342	1768	1,724	16,911	21min07s
<b>Média</b>	<b>5345,8</b>	<b>1771,8</b>	<b>1,728</b>	<b>16,948</b>	<b>20min51s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 38: Dados obtidos para H=60 cm, h=60 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5340	1766	1,722	16,892	2min10s
2	5334	1760	1,716	16,835	2min20s
3	5336	1762	1,718	16,854	2min04s
4	5332	1758	1,714	16,816	2min08s
5	5330	1756	1,712	16,797	2min14s
6	5350	1776	1,732	16,988	2min08s
7	5344	1770	1,726	16,931	2min05s
8	5344	1770	1,726	16,931	1min55s
9	5342	1768	1,724	16,911	2min05s
10	5340	1766	1,722	16,892	2min13s
<b>Média</b>	<b>5339,2</b>	<b>1765,2</b>	<b>1,721</b>	<b>16,885</b>	<b>2min08s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 39: Dados obtidos para H=60 cm, h=60 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5290	1716	1,673	16,414	36
2	5294	1720	1,677	16,452	37
3	5318	1744	1,701	16,682	36
4	5300	1726	1,683	16,510	36
5	5310	1736	1,693	16,605	33
6	5294	1720	1,677	16,452	34
7	5286	1712	1,669	16,376	36
8	5302	1728	1,685	16,529	36
9	5308	1734	1,691	16,586	37
10	5304	1730	1,687	16,548	35
Média	5300,6	1726,6	1,684	16,515	36

Fonte: Autor.

Tabela 40: Dados obtidos para H=60 cm, h=60 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5196	1622	1,582	15,515	16
2	5202	1628	1,587	15,572	16
3	5218	1644	1,603	15,725	16
4	5204	1630	1,589	15,591	16
5	5218	1644	1,603	15,725	16
6	5224	1650	1,609	15,783	16
7	5194	1620	1,580	15,496	16
8	5216	1642	1,601	15,706	17
9	5220	1646	1,605	15,745	17
10	5216	1642	1,601	15,706	16
<b>Média</b>	<b>5210,8</b>	<b>1636,8</b>	<b>1,596</b>	<b>15,657</b>	<b>16</b>

Fonte: Autor.

Tabela 41: Dados obtidos para H=60 cm, h=60 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5136	1562	1,523	14,941	9
2	5132	1558	1,519	14,903	10
3	5140	1566	1,527	14,979	10
4	5134	1560	1,521	14,922	10
5	5132	1558	1,519	14,903	9
6	5130	1556	1,517	14,884	9
7	5138	1564	1,525	14,960	10
8	5140	1566	1,527	14,979	10
9	5136	1562	1,523	14,941	10
10	5132	1558	1,519	14,903	10
<b>Média</b>	<b>5135</b>	<b>1561</b>	<b>1,522</b>	<b>14,931</b>	<b>10</b>

Fonte: Autor.

2.5 Ensaio com a altura do Funil até a peneira superior igual a 70 cm ( $H=70$  cm).

Tabela 42: Dados obtidos para  $H=70$  cm,  $h=40$  cm e  $d=5$  mm.

Corpos de prova	Massa total [g]	Massa da areia [g]	Densidade [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Peso	
				Específico [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	Tempo [min,s]
1	5350	1776	1,732	16,988	20min16s
2	5352	1778	1,734	17,007	22min05s
3	5348	1774	1,730	16,969	22min10s
4	5346	1772	1,728	16,950	19min10s
5	5348	1774	1,730	16,969	22min31s
6	5348	1774	1,730	16,969	20min38s
7	5348	1774	1,730	16,969	20min54s
8	5350	1776	1,732	16,988	21min13s
9	5346	1772	1,728	16,950	20min12s
10	5350	1776	1,732	16,988	20min51s
Média	5348,6	1774,6	1,730	16,975	21min

Fonte: Autor.

Tabela 43: Dados obtidos para H=70 cm, h=40 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5340	1766	1,722	16,892	1min56s
2	5342	1768	1,724	16,911	1min56s
3	5338	1764	1,720	16,873	1min55s
4	5334	1760	1,716	16,835	1min57s
5	5338	1764	1,720	16,873	1min56s
6	5330	1756	1,712	16,797	2min
7	5332	1758	1,714	16,816	2min01s
8	5336	1762	1,718	16,854	2min02s
9	5342	1768	1,724	16,911	1min56s
10	5338	1764	1,720	16,873	1min58s
<b>Média</b>	<b>5337</b>	<b>1763</b>	<b>1,719</b>	<b>16,864</b>	<b>1min58s</b>

Fonte: Autor.



Tabela 44: Dados obtidos para H=70 cm, h=40 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5306	1732	1,689	16,567	37
2	5318	1744	1,701	16,682	39
3	5314	1740	1,697	16,644	36
4	5322	1748	1,704	16,720	36
5	5320	1746	1,702	16,701	35
6	5304	1730	1,687	16,548	36
7	5316	1742	1,699	16,663	36
8	5312	1738	1,695	16,625	37
9	5310	1736	1,693	16,605	38
10	5306	1732	1,689	16,567	38
<b>Média</b>	<b>5312,8</b>	<b>1738,8</b>	<b>1,695</b>	<b>16,632</b>	<b>37</b>

Fonte: Autor.

Tabela 45: Dados obtidos para H=70 cm, h=40 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5238	1664	1,622	15,917	19
2	5244	1670	1,628	15,974	18
3	5268	1694	1,652	16,204	18
4	5240	1666	1,624	15,936	19
5	5254	1680	1,638	16,070	18
6	5256	1682	1,640	16,089	18
7	5246	1672	1,630	15,993	18
8	5252	1678	1,636	16,051	19
9	5254	1680	1,638	16,070	19
10	5250	1676	1,634	16,031	18
Média	5250,2	1676,2	1,634	16,033	18

Fonte: Autor.

Tabela 46: Dados obtidos para H=70 cm, h=40 cm e d=25 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5184	1610	1,570	15,400	10
2	5182	1608	1,568	15,381	11
3	5168	1594	1,554	15,247	12
4	5164	1590	1,550	15,209	12
5	5164	1590	1,550	15,209	12
6	5172	1598	1,558	15,285	11
7	5178	1604	1,564	15,343	11
8	5186	1612	1,572	15,419	12
9	5180	1606	1,566	15,362	12
10	5182	1608	1,568	15,381	11
<b>Média</b>	<b>5176</b>	<b>1602</b>	<b>1,562</b>	<b>15,324</b>	<b>11</b>

Fonte: Autor.

Tabela 47: Dados obtidos para H=70 cm, h=60 cm e d=5 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5340	1766	1,722	16,892	24min28s
2	5346	1772	1,728	16,950	24min38
3	5346	1772	1,728	16,950	24min27s
4	5338	1764	1,720	16,873	26min57s
5	5340	1766	1,722	16,892	26min54s
6	5342	1768	1,724	16,911	24min13s
7	5336	1762	1,718	16,854	24min28s
8	5344	1770	1,726	16,931	24min21s
9	5340	1766	1,722	16,892	25min18s
10	5338	1764	1,720	16,873	25min46s
<b>Média</b>	<b>5341</b>	<b>1767</b>	<b>1,723</b>	<b>16,902</b>	<b>25min09s</b>

Fonte: Autor.

Tabela 48: Dados obtidos para H=70 cm, h=60 cm e d=10 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [min,s]</b>
1	5344	1770	1,726	16,931	2min28s
2	5342	1768	1,724	16,911	2min32s
3	5340	1766	1,722	16,892	2min06s
4	5342	1768	1,724	16,911	2min15s
5	5326	1752	1,708	16,758	2min16s
6	5324	1750	1,706	16,739	2min20s
7	5334	1760	1,716	16,835	2min17s
8	5340	1766	1,722	16,892	2min19s
9	5332	1758	1,714	16,816	2min27s
10	5338	1764	1,720	16,873	2min21s
Média	5336,2	1762,2	1,718	16,856	2min20s

Fonte: Autor.

Tabela 49: Dados obtidos para H=70 cm, h=60 cm e d=15 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5308	1734	1,691	16,586	37
2	5310	1736	1,693	16,605	36
3	5302	1728	1,685	16,529	36
4	5298	1724	1,681	16,491	36
5	5294	1720	1,677	16,452	38
6	5308	1734	1,691	16,586	37
7	5312	1738	1,695	16,625	36
8	5310	1736	1,693	16,605	36
9	5312	1738	1,695	16,625	38
10	5304	1730	1,687	16,548	36
<b>Média</b>	<b>5305,8</b>	<b>1731,8</b>	<b>1,689</b>	<b>16,565</b>	<b>37</b>

Fonte: Autor.

Tabela 50: Dados obtidos para H=70 cm, h=60 cm e d=20 mm.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Massa total [g]</b>	<b>Massa da areia [g]</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Peso Específico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [s]</b>
1	5222	1648	1,607	15,764	17
2	5252	1678	1,636	16,051	17
3	5242	1668	1,626	15,955	17
4	5226	1652	1,611	15,802	18
5	5242	1668	1,626	15,955	17
6	5248	1674	1,632	16,012	16
7	5242	1668	1,626	15,955	16
8	5238	1664	1,622	15,917	17
9	5232	1658	1,617	15,859	18
10	5230	1656	1,615	15,840	17
Média	5237,4	1663,4	1,622	15,911	17

Fonte: Autor.

Tabela 51: Dados obtidos para H=70 cm, h=60 cm e d=25 mm.

Corpos de prova	Massa total [g]	Massa da areia [g]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Peso Específico [kN/m <sup>3</sup> ]	Tempo [s]
1	5154	1580	1,541	15,113	10
2	5142	1568	1,529	14,998	10
3	5154	1580	1,541	15,113	10
4	5174	1600	1,560	15,305	9
5	5158	1584	1,544	15,151	10
6	5146	1572	1,533	15,037	10
7	5164	1590	1,550	15,209	10
8	5152	1578	1,539	15,094	10
9	5162	1588	1,548	15,190	9
10	5148	1574	1,535	15,056	10
Média	5155,4	1581,4	1,542	15,127	10

Fonte: Autor.

## 2.6 Análise de resultados obtidos com os ensaios.

Com a altura do bocal do funil até a peneira superior de 30 cm, com altura da peneira inferior até a base do cilindro de 40 cm e diâmetro da abertura do funil de 25 mm, foi obtida a densidade mínima de 1,475 g/cm<sup>3</sup>.

Para calcular o índice de vazios máximo, divide-se a densidade real dos grãos (2,669 g/cm<sup>3</sup>) pela densidade mínima, o resultado desta divisão subtrai-se 1. Deste modo, o índice de vazios máximo ( $e_{\max}$ ) foi de 0,809.



Já com a altura do bocal do funil até a peneira superior de 70 cm, com altura da peneira inferior até a base do cilindro de 40 cm e diâmetro da abertura do funil de 5 mm, obteve-se a densidade máxima de 1,730 g/cm<sup>3</sup>.

Para calcular o índice de vazios mínimo, divide-se a densidade real dos grãos (2,669 g/cm<sup>3</sup>) pela densidade máxima, o resultado desta divisão subtrai-se 1. Deste modo, o índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) foi de 0,543.

Com esses resultados pode ser calculada a compacidade relativa, dada pela Equação 1, onde  $e_{\text{nat}}$ , é o índice de vazios calculado com as densidades obtidas nos ensaios.

$$CR = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

Segundo Miura & Toki (1982), o método da chuva de areia é um bom método para obter altas densidades de areia, maiores até que em ensaios convencionais como de vibração ou impacto.

No estudo para a mesma areia de Analândia (SP), foi calculada a densidade máxima, baseada na NBR 12051/91, e a densidade mínima, baseada na NBR 12004/90, o qual obteve os valores apresentados na Tabela 52. Já a Tabela 53, apresenta os dados obtidos pelo método da chuva de areia realizada pelo autor.

Tabela 52: Dados levantados por métodos convencionais.

Densidades [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{\min} = 1,46$	$\rho_{\max} = 1,66$
Índice de vazios	$e_{\max} = 0,828$	$e_{\min} = 0,608$
Pesos específicos seco [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\min} = 14,32$	$\gamma_{\max} = 16,28$
Densidade real dos grãos [g/cm <sup>3</sup> ]	2,669	

Fonte: Autor.

Tabela 53: Dados levantados pelo método da chuva de areia em laboratório.

Densidades [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{\min} = 1,464$	$\rho_{\max} = 1,734$
Índice de vazios	$e_{\max} = 0,823$	$e_{\min} = 0,539$
Pesos específicos seco [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\min} = 14,36$	$\gamma_{\max} = 17,01$

Fonte: Autor.

Com os dados acima, foi observado que se obteve uma densidade máxima maior com o método da chuva de areia, conforme previsto por Miura&Toki (1982).

Assim, foi possível calcular as diferentes compacidades relativas para cada ensaio, que estão listadas nas Tabelas 54 e 55.

Tabela 54: Diferentes compacidades relativas para h = 40 cm.

Diâmetro do Bocal [mm]	H [cm]	Compacidade relativa (%)
5	30	96,30%
	40	93,23%
	50	98,66%
	60	99,67%
	70	100,00%
10	30	83,14%
	40	84,20%
	50	92,55%
	60	97,99%
	70	96,30%
15	30	57,27%
	40	71,22%
	50	71,59%
	60	82,07%
	70	88,06%
20	30	18,78%
	40	26,94%
	50	36,97%
	60	48,28%
	70	66,02%
25	30	0,00%
	40	3,66%
	50	15,73%
	60	28,21%
	70	37,79%

Fonte: Autor.

Tabela 55: Diferentes compacidades relativas para h = 60 cm

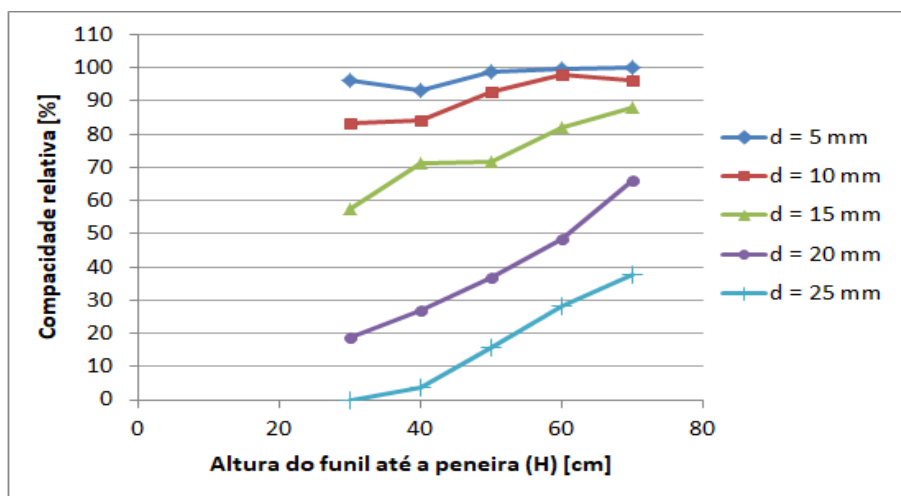
Diâmetro do Bocal [mm]	H [cm]	Compacidade relativa (%)
5	30	94,94%
	40	95,28%
	50	96,98%
	60	99,33%
	70	97,65%
10	30	87,01%
	40	88,75%
	50	91,86%
	60	96,98%
	70	95,96%
15	30	56,89%
	40	59,96%
	50	70,48%
	60	84,20%
	70	85,96%
20	30	21,38%
	40	26,52%
	50	45,49%
	60	51,43%
	70	61,49%
25	30	2,29%
	40	9,08%
	50	17,04%
	60	20,95%
	70	29,48%

Fonte: Autor.

Com os dados das Tabelas 54 e 55, foi possível plotar as curvas das Figuras 1 e 2 abaixo, que comparam as diferentes compacidades relativas, para cada altura de queda do funil até a peneira superior (H) e para cada diâmetro de abertura do bocal do funil (d).

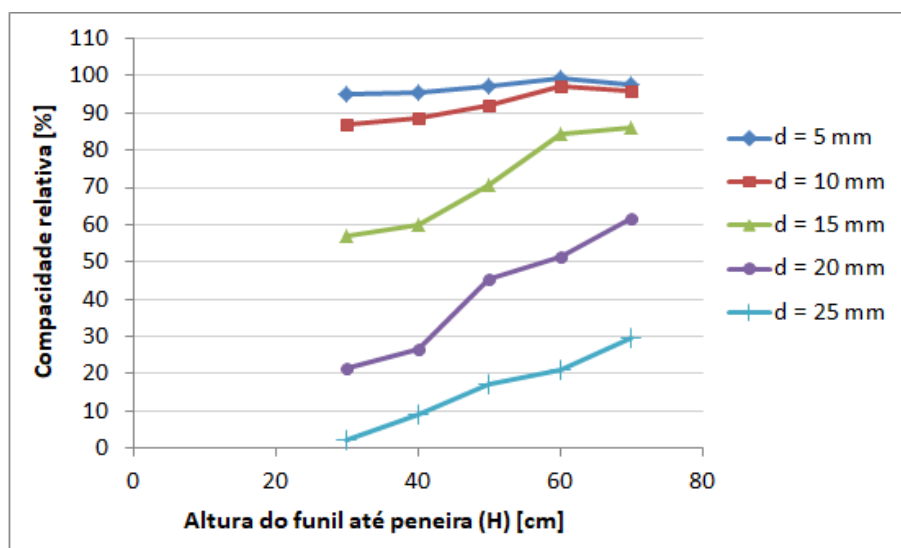
As Figuras 3, 4, 5, 6 e 7 comparam as diferentes compacidades relativas produzidas para cada altura de queda da peneira inferior até a base do cilindro (h).

Figura 1: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de d e H, com a altura de queda da peneira inferior até a base do cilindro igual a 40 cm.



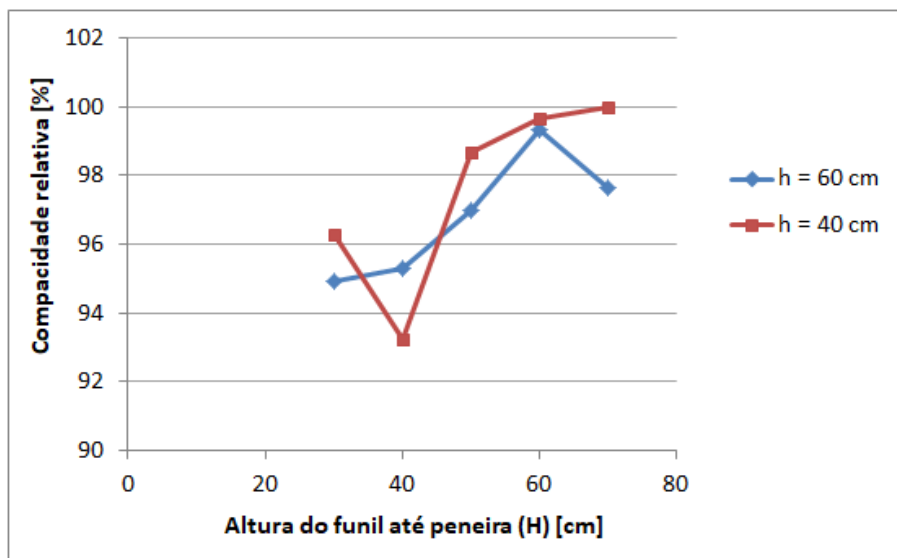
Fonte: Autor.

Figura 2: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de d e H, com a altura de queda da peneira inferior até a base do cilindro igual a 60 cm.



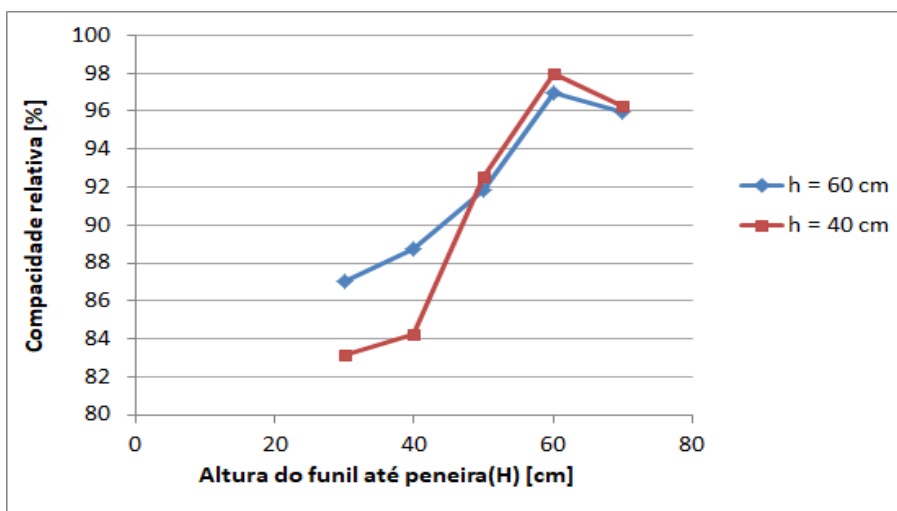
Fonte: Autor.

Figura 3: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de H e h, com a abertura do bocal do funil de 5 mm.



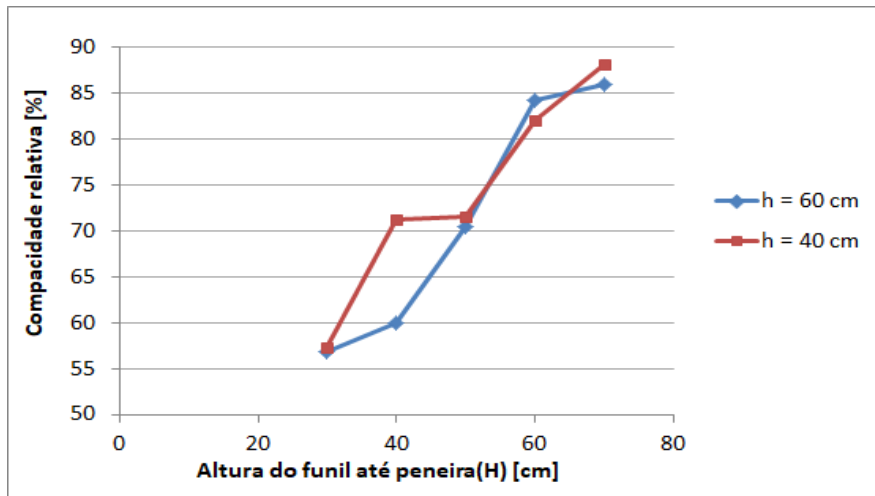
Fonte: Autor.

Figura 4: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de H e h, com a abertura do bocal do funil de 10 mm.



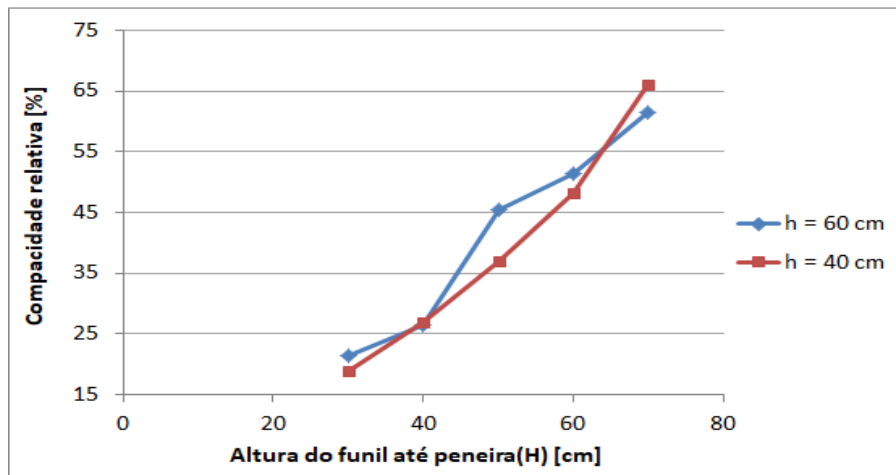
Fonte: Autor.

Figura 5: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de H e h, com a abertura do bocal do funil de 15 mm.



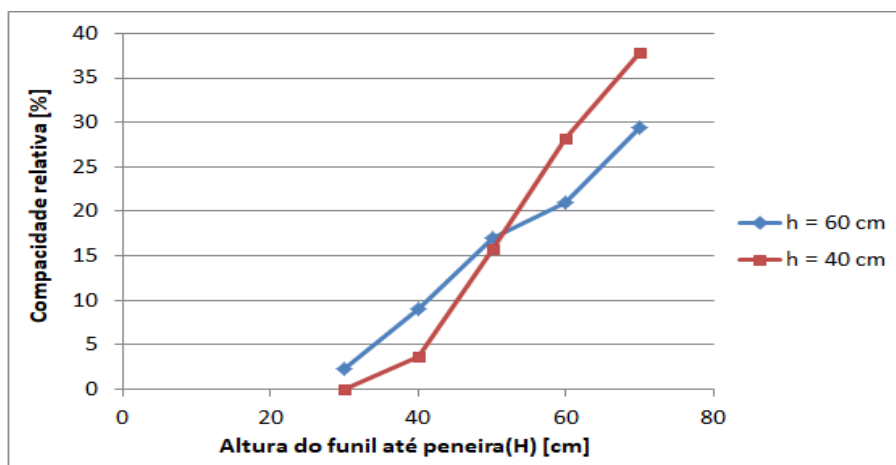
Fonte: Autor.

Figura 6: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de H e h, com a abertura do bocal do funil de 20 mm.



Fonte: Autor.

Figura 7: Compacidades relativas produzidas sobre várias combinações de H e h, com a abertura do bocal do funil de 25 mm.



Fonte: Autor.

Analisando as Figuras 1 e 2, foi observado que o diâmetro de abertura do bocal do funil e a altura de queda do funil até a peneira superior são os fatores principais que influenciam na compacidade relativa do corpo de prova. Sendo que quanto maior o diâmetro de abertura menor é a compacidade, e quanto maior a altura do funil até a peneira superior maior é a compacidade relativa.

Isso está relacionado à taxa de deposição da areia no cilindro. Conforme um número maior de grãos de areia se deposita no cilindro em um intervalo de tempo menor, menor é a acomodação dos grãos de areia e assim maior o índice de vazios.

Analisando as Figuras 3, 4, 5, 6 e 7, foi observado que a altura de queda da peneira inferior até a base do cilindro pouco interferiu na densidade das amostras.

Essa distância, da peneira até a base do cilindro, foi denominada por Miura & Toki (1982) como a “altura de queda” e segundo os autores é insignificante para a densidade das amostras.

Pôde-se observar também, que a abertura de 10 mm produziu densidades tão altas quanto a abertura de 5 mm, tendo grande diferença no tempo de deposição.

Dessa forma, o chuveiro foi projetado com uma placa de acrílico com furos circulares com diâmetro de 10 mm, já que com essa abertura levou-se bem menos tempo para encher o cilindro



e produziu-se compacidades relativas em torno de 90 %, que foi a densidade pré-estabelecida a ser alcançada na câmara de calibração.

## APÊNDICE C – Calibração das estacas helicoidais

Para uma melhor abordagem do passo a passo, foi dividido em 2 partes o processo da calibração: (1) Calibração das estacas sob tração e; (2) Calibração das estacas sob torque, conforme será descrito a seguir.

### (1) Calibração das estacas sob tração:

A primeira coisa a ser feita é adaptar o equipamento de cisalhamento direto de rochas para receber as estacas. A figura 01 mostra a peça que teve que ser feita pela VERCON para que os ensaios de tração possam ser realizados.

Figura 01: Peça suporte 01.



Fonte: Autor.

A peça suporte 01 foi feita para “segurar” a estaca helicoidal na posição horizontal até que começasse o ensaio. A figura 02, a seguir mostra uma foto geral de como foi montado o ensaio de calibração para a tração da estaca. As figuras 03 a 07 mostram em sequência como foram feitas as ligações entre todas as peças.

Figura 02: Vista Geral do ensaio de calibração da estaca sob tração.



Fonte: Autor.

Figura 03: Ligações entre as peças 01.



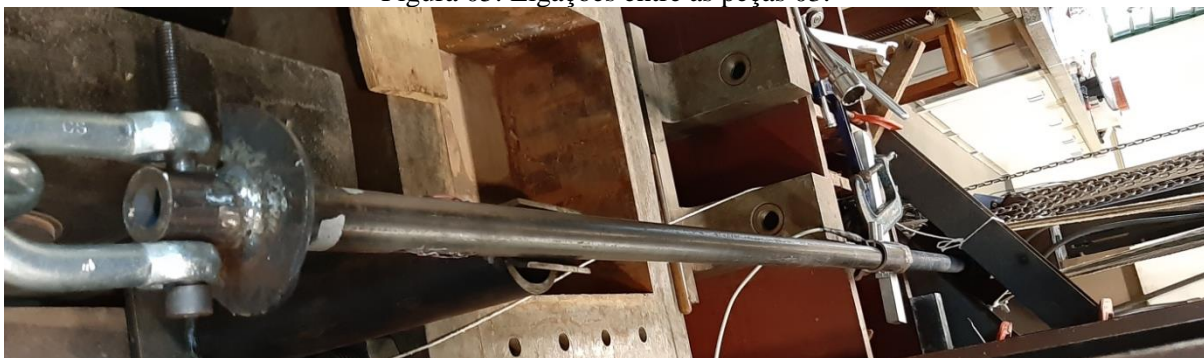
Fonte: Autor.

Figura 04: Ligações entre as peças 02.



Fonte: Autor.

Figura 05: Ligações entre as peças 03.



Fonte: Autor.

Figura 06: Ligações entre as peças 04.



Fonte: Autor.

Figura 07: Ligações entre as peças 05.



Fonte: Autor.

Conforme mostra a figura 3, primeiro fixamos a barra Dywidag na estrutura de reação do equipamento de cisalhamento direto da mecânica das rochas para segurar toda a barra e ser utilizada como reação a tração da estaca. A barra Dywidag utilizada tem aproximadamente 2

metros de comprimento e diâmetro de 30mm. Que por sua vez foi ligada a um “copo” (utilizado para ensaios de arrancamento em campo) com comprimento aproximadamente 370 mm e diâmetro do tubo de 97mm. A chapa soldada no topo do tubo tem 150 x 150 mm e espessura de 30 mm.

Conforme mostra a figura 4, foram conectadas 5 manilhas de 1 polegada que funcionaram como elos de corrente para ligar o copo e a base da estaca.

Conforme mostra a figura 5, a manilha foi conectada com a base da estaca através de um parafuso m12 com resistência 12.9 (tipo Alien).

Conforme mostra a figura 6, a cabeça da estaca foi ligada através de 2 parafusos m12 com resistência 8.8 numa peça também fabricada na VERCON Engenharia. Nesta peça fabricada, foi rosqueada uma outra barra Dywidag com comprimento de aproximadamente 1.20 metros e diâmetro de 40 mm.

Conforme mostra a figura 7, A barra Dywidag foi inserida dentro de um macaco vazado com capacidade de 30 Toneladas e uma célula de carga utilizada para medir a força de arrancamento do macaco vazado.

Após toda a estrutura ter sido montada bombeou se o macaco com aproximadamente 500 kgf para que a estrutura estivesse bem firme e sem folgas nas ligações. Em seguida foi zerado o visor da célula de carga e o programa para aquisição de dados para iniciar a calibração. Para a aquisição de dados foi utilizado o CATMAN versão 3.5 da empresa HBM.

Para a calibração da estaca foi bombeando o macaco vazado até atingir a carga de 500 kgf e anotava o valor de resposta da estaca a tração. Em seguida, aumentava a carga com mais 500kgf e anotava a resposta da estaca a tração. Era repetido essa ação até que fosse atingido a carga máxima no ensaio de 10 Toneladas. Para verificar a histerese da curva, após o fim do ensaios diminuíamos a carga de 1 Tonelada até que fosse zerada a carga na estaca. A seguir, as figuras 08 a 16 estão as curvas de calibração das estacas 01 a 09.

Os pontos azuis nas curvas de calibração representam o carregamento e a os vermelhos representam o descarregamento.

Figura 08: Curva de calibração da ESTACA 01.

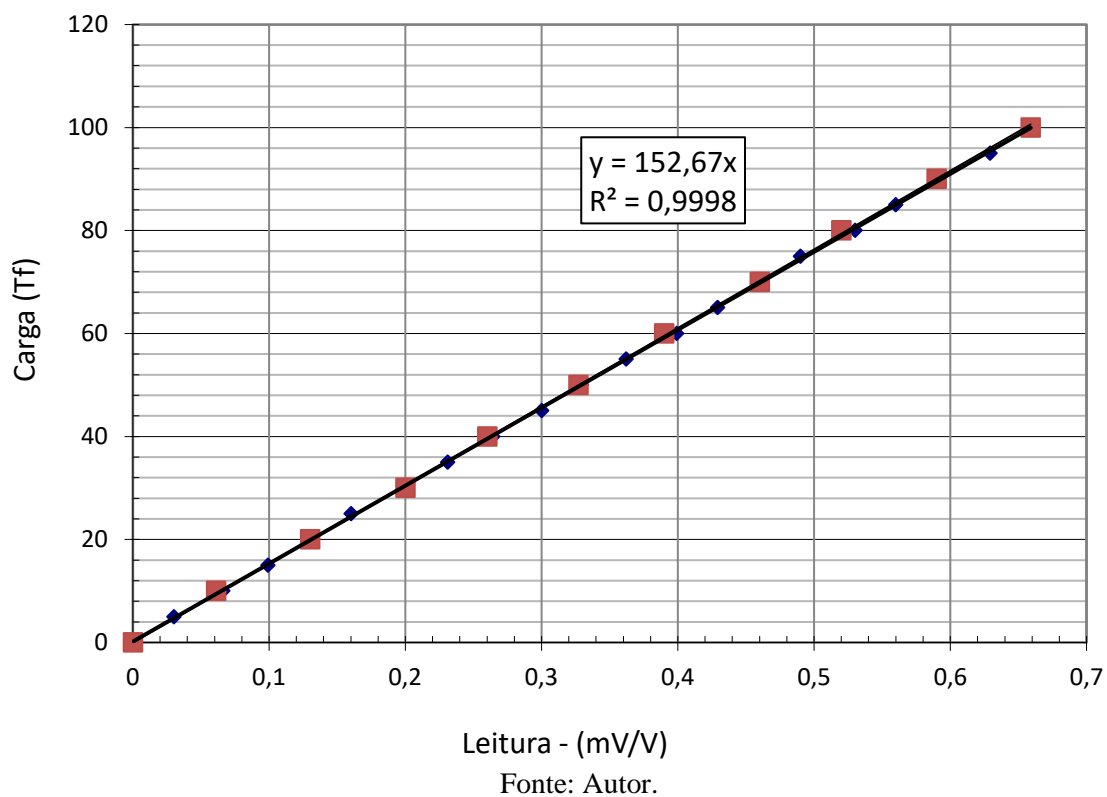


Figura 09: Curva de calibração da ESTACA 02.

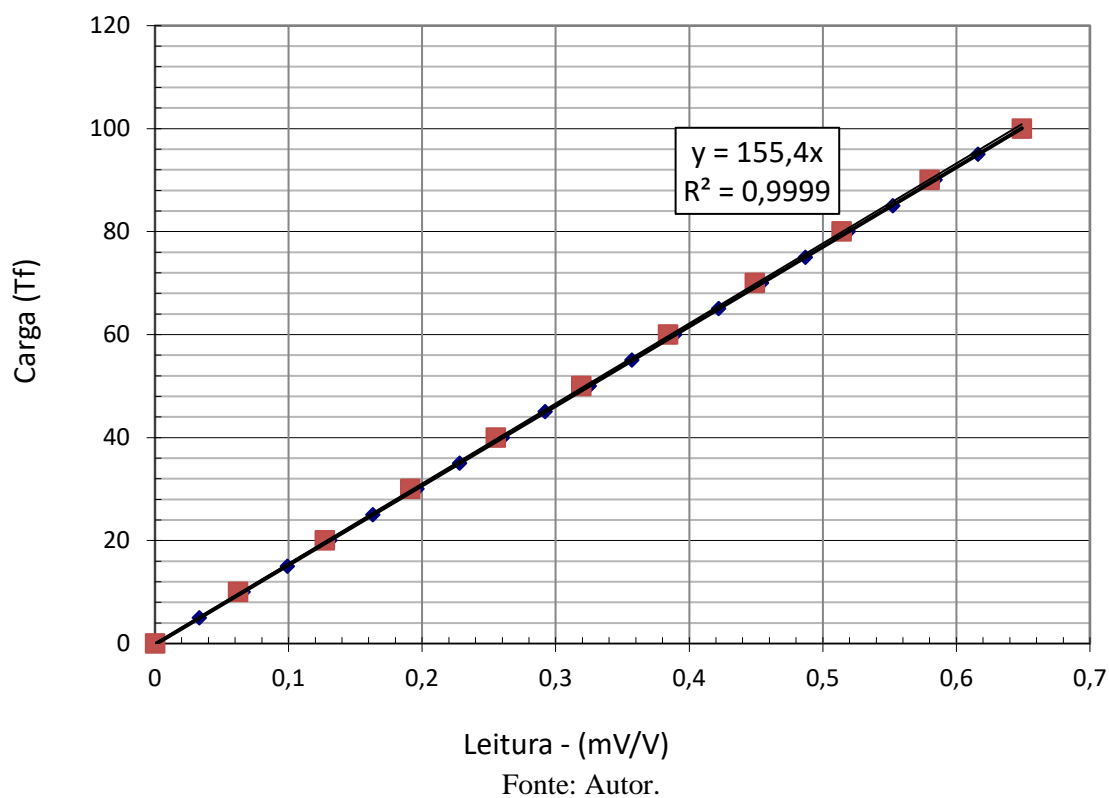


Figura 10: Curva de calibração da ESTACA 03.

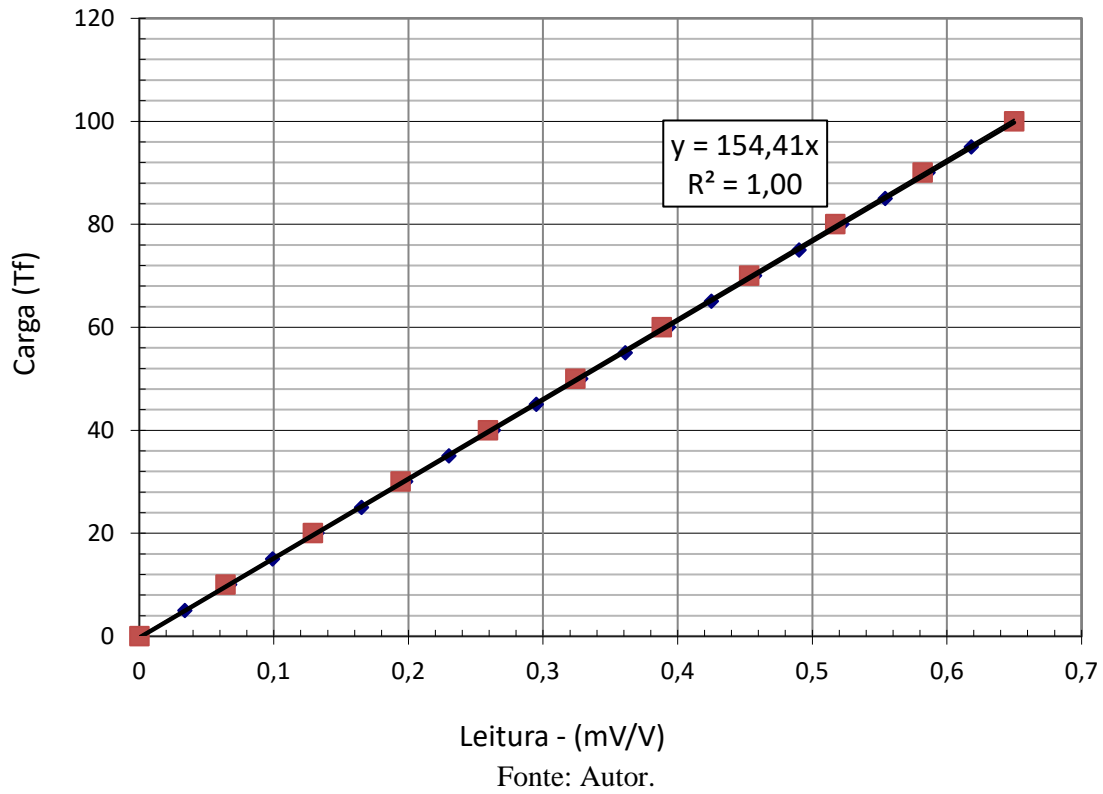


Figura 11: Curva de calibração da ESTACA 04.

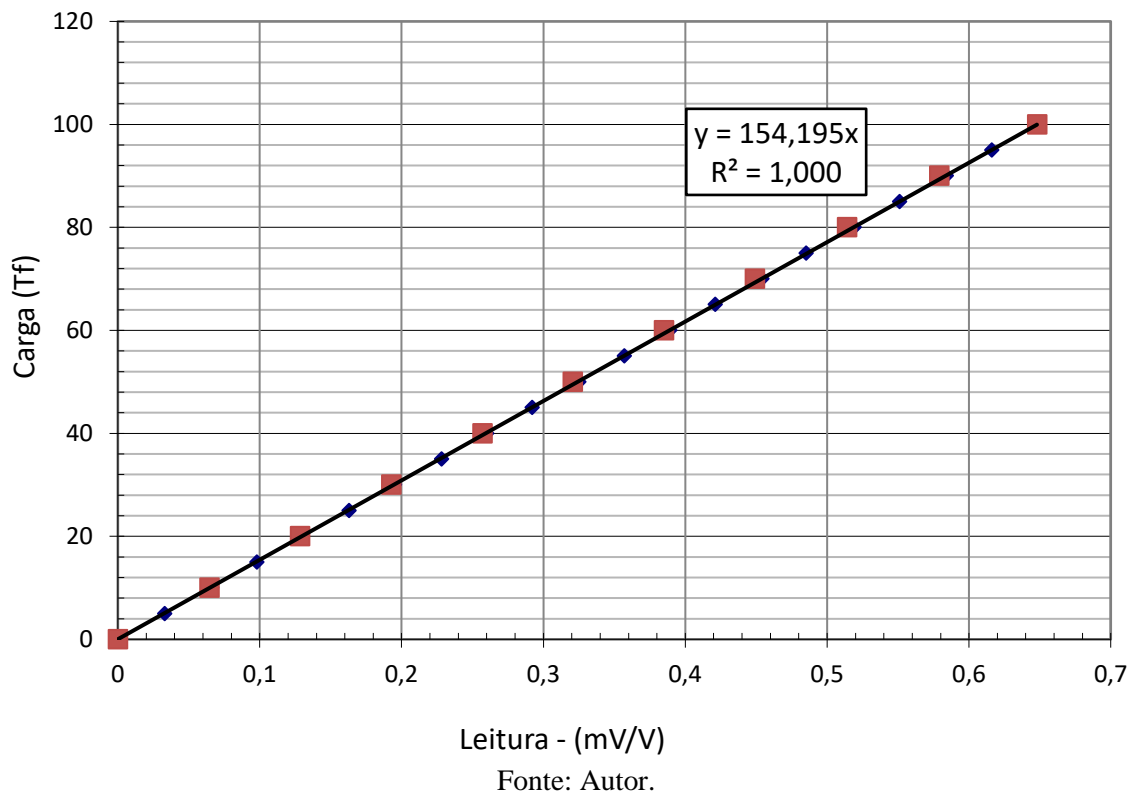


Figura 12: Curva de calibração da ESTACA 05.

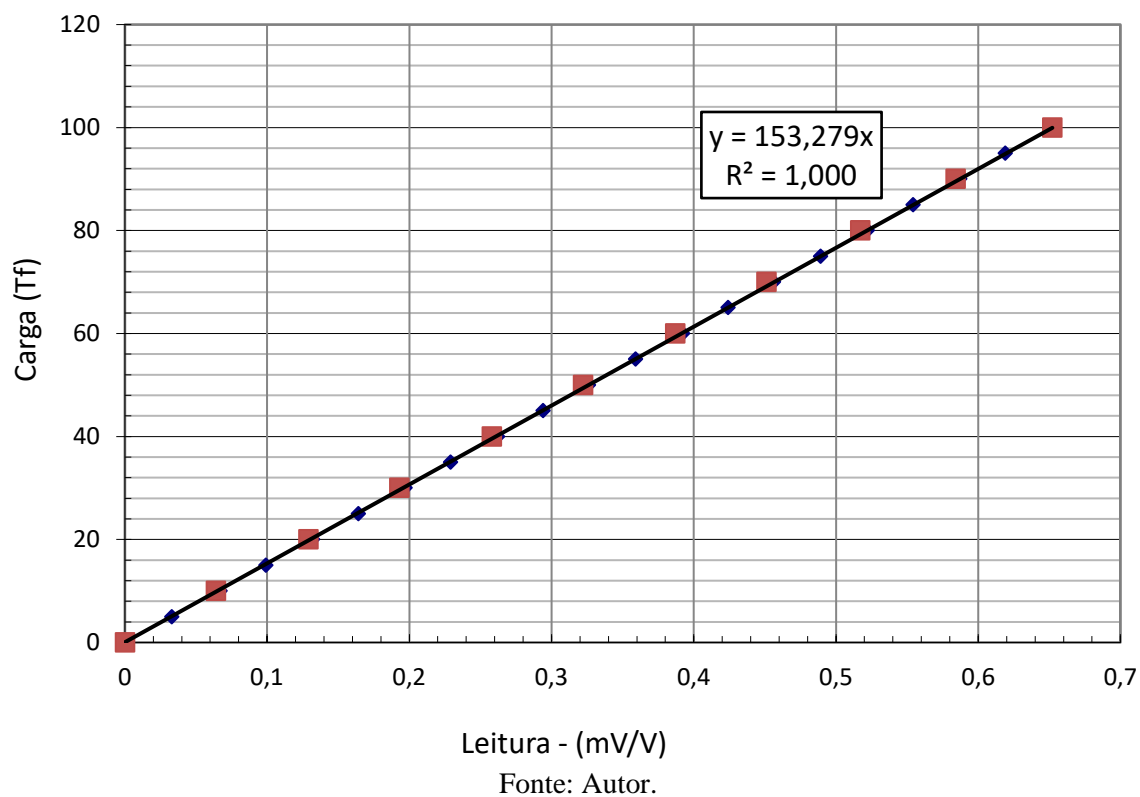


Figura 13: Curva de calibração da ESTACA 06.

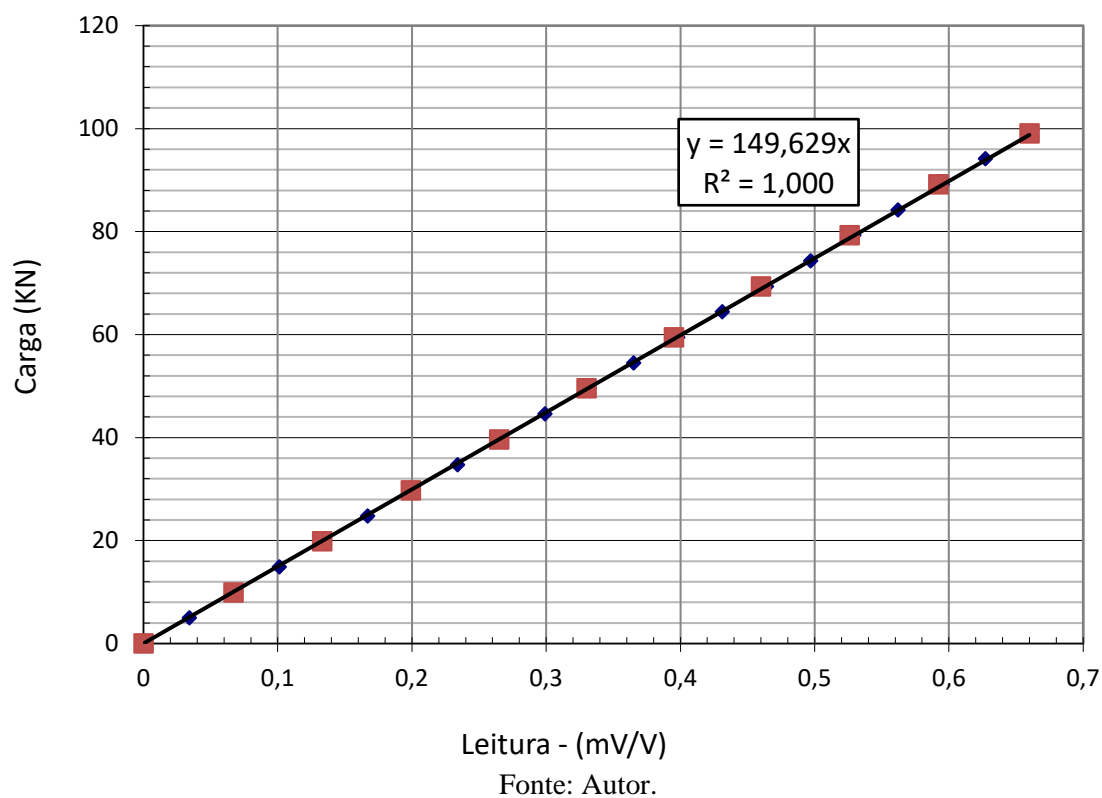




Figura 14: Curva de calibração da ESTACA 07.

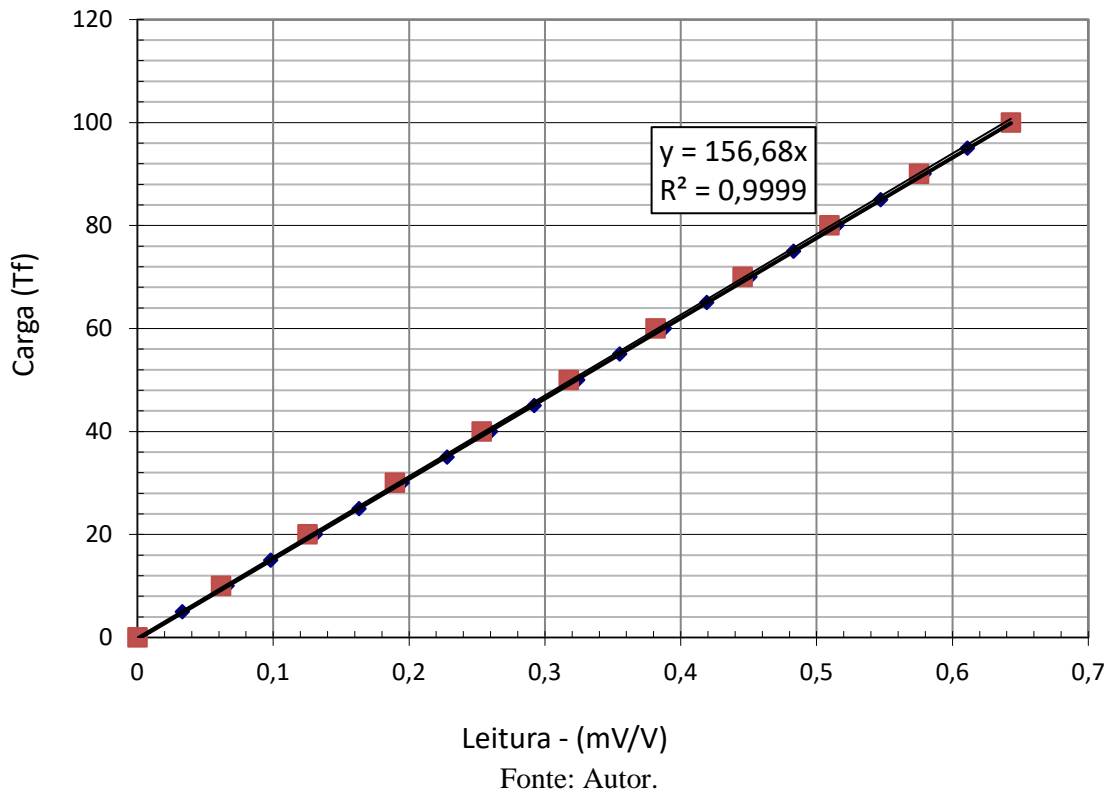


Figura 15: Curva de calibração da ESTACA 08.

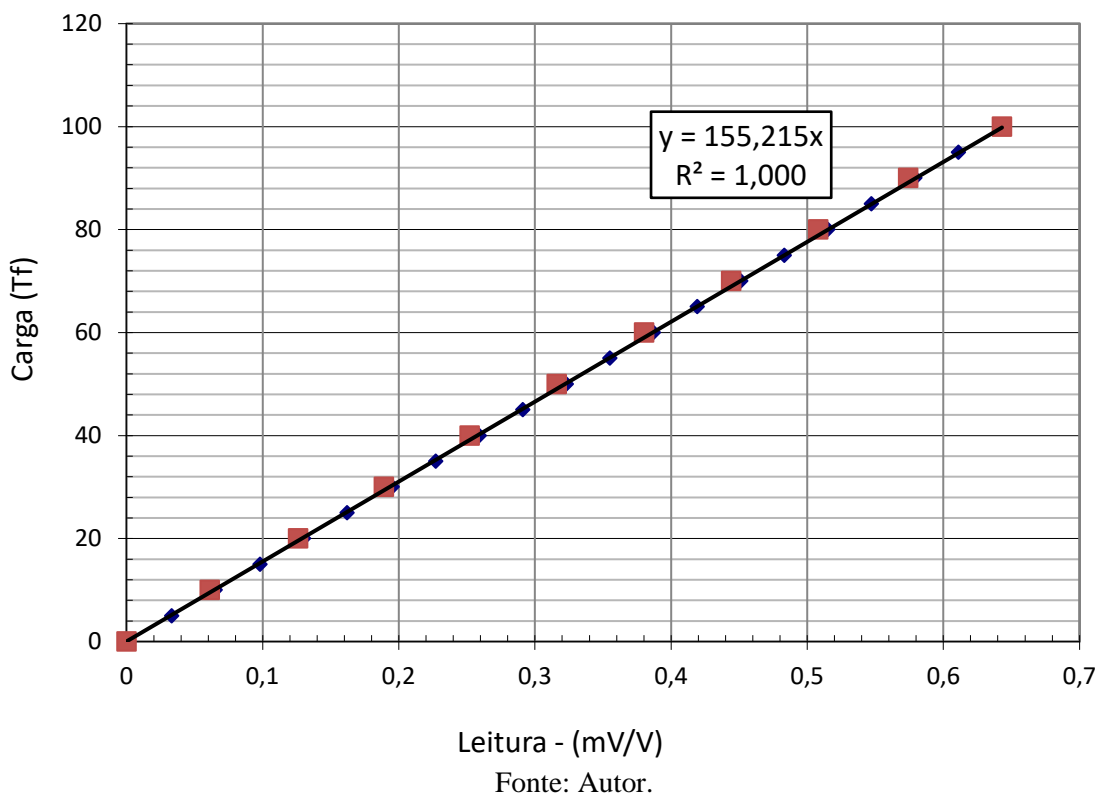
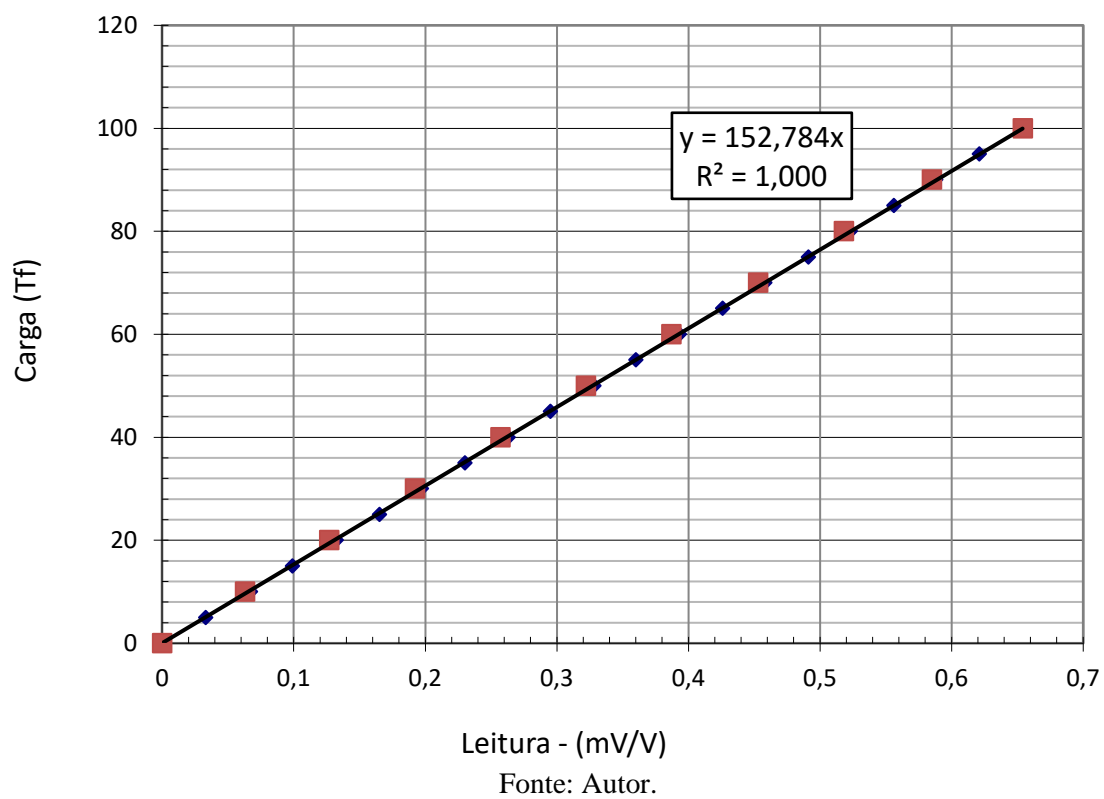


Figura 16: Curva de calibração da ESTACA 09.



(2) Calibração das estacas sob torque:

A primeira coisa a ser feita é adaptar o equipamento de cisalhamento direto de rochas para receber as estacas. A figura 17 mostra a peça que teve que ser feita pela VERCON para que os ensaios possam ser realizados. A figura 18 mostra a peça que teve que ser feita pela Oficina mecânica da USP para que os ensaios possam ser realizados

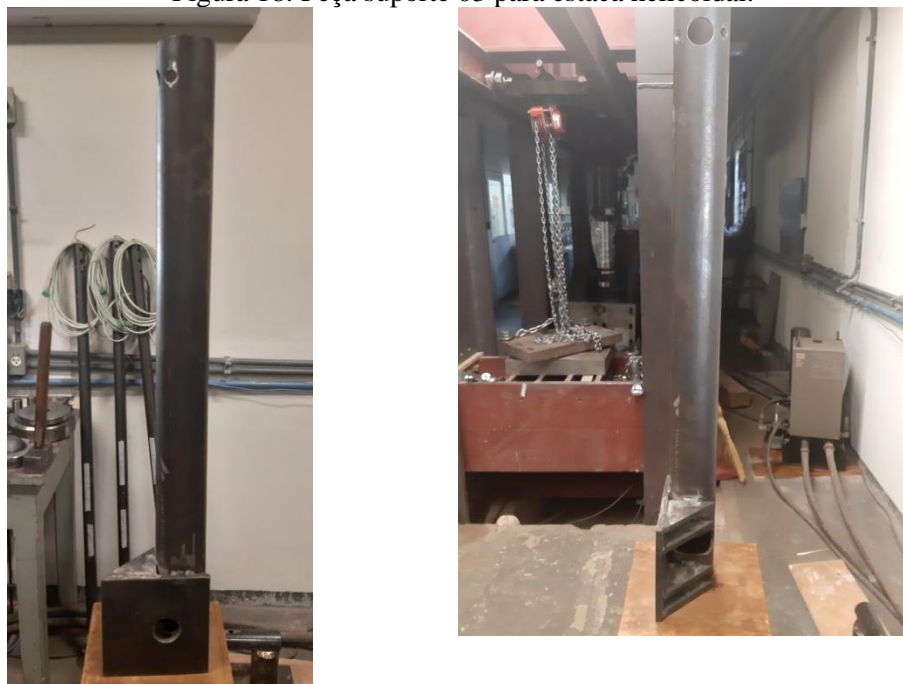
Figura 17: Peça suporte 02 para estaca helicoidal.



Fonte: Autor.

A peça suporte 02 foi feita para “segurar” a estaca helicoidal na posição horizontal para que quando começasse o ensaio do torque ela não girasse. A peça suporte 03 foi feita para “aplicar” o torque na estaca helicoidal. A figura 19 mostra uma foto geral de como foi montado o ensaio de calibração para a torção da estaca. As figuras 20 e 21 mostram em sequência como foram feitas as ligações entre todas as peças.

Figura 18: Peça suporte 03 para estaca helicoidal.



Fonte: Autor.

Figura 19: Vista Geral do ensaio de calibração da estaca sob tração.



Fonte: Autor.

Figura 20: Ligações entre as peças 01.



Fonte: Autor.

Figura 21: Ligações entre as peças 02.



Fonte: Autor.

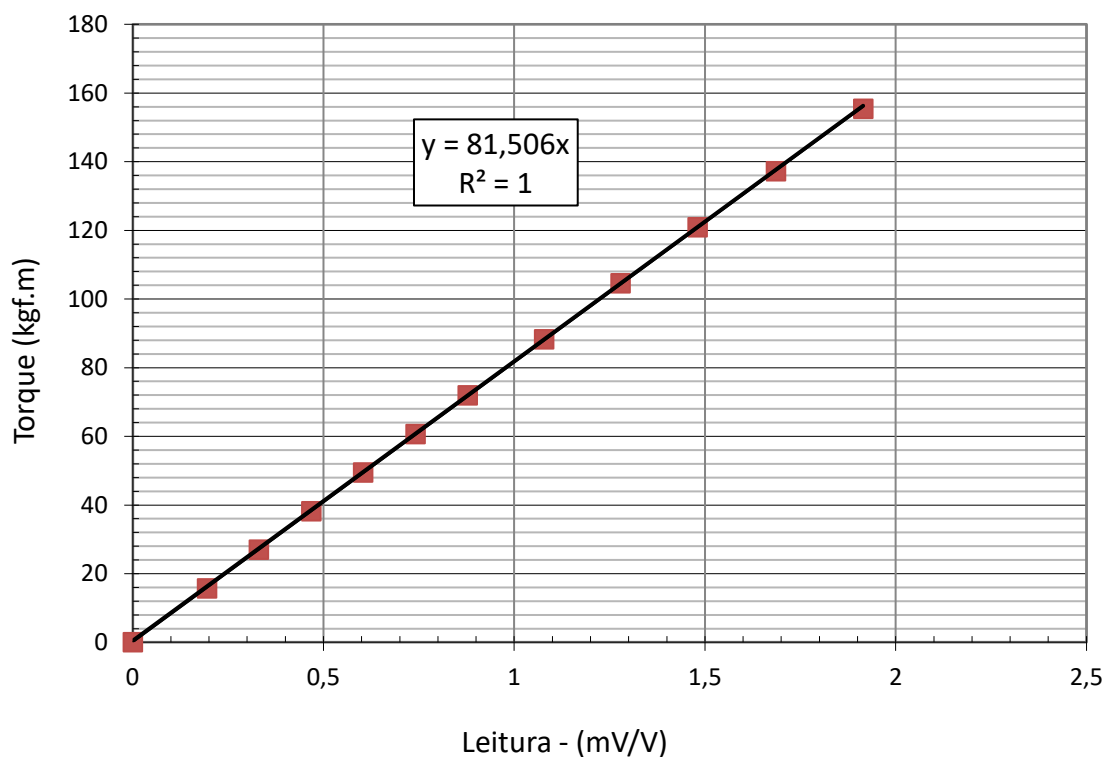
Conforme mostra a figura 20, primeiro fixamos peça suporte 2 na viga do equipamento de cisalhamento direto do laboratório de mecânica das rochas para a cabeça da estaca não girasse junto com o torque aplicado. Como a força máxima no braço de alavanca foi de 155.4 kgf.m, apenas 2 manilhas de 1 polegada foram suficientes para suportar.

Conforme mostra a figura 21, foi colocado um rolamento no apoio da peça suporte 1 para que não tivesse atrito durante a calibração da estaca.

Após toda a estrutura ter sido foi colocando pesos na ponta da peça suporte 3 até que fosse atingido 155.4 kgf.m. Ao termino do ensaio, foi retirada os pesos na mesma proporção que se colocava e fizemos o descarregamento do ensaio para obter a curva de carregamento e descarregamento e verificamos a histerese. Para a aquisição de dados foi utilizado o CATMAN versão 3.5 da empresa HBM.

A seguir, as figuras 22 a 30 estão as curvas de calibração das estacas 01 a 09.

Figura 22: Curva de calibração da ESTACA 01.



Fonte: Autor.

Figura 23: Curva de calibração da ESTACA 02.

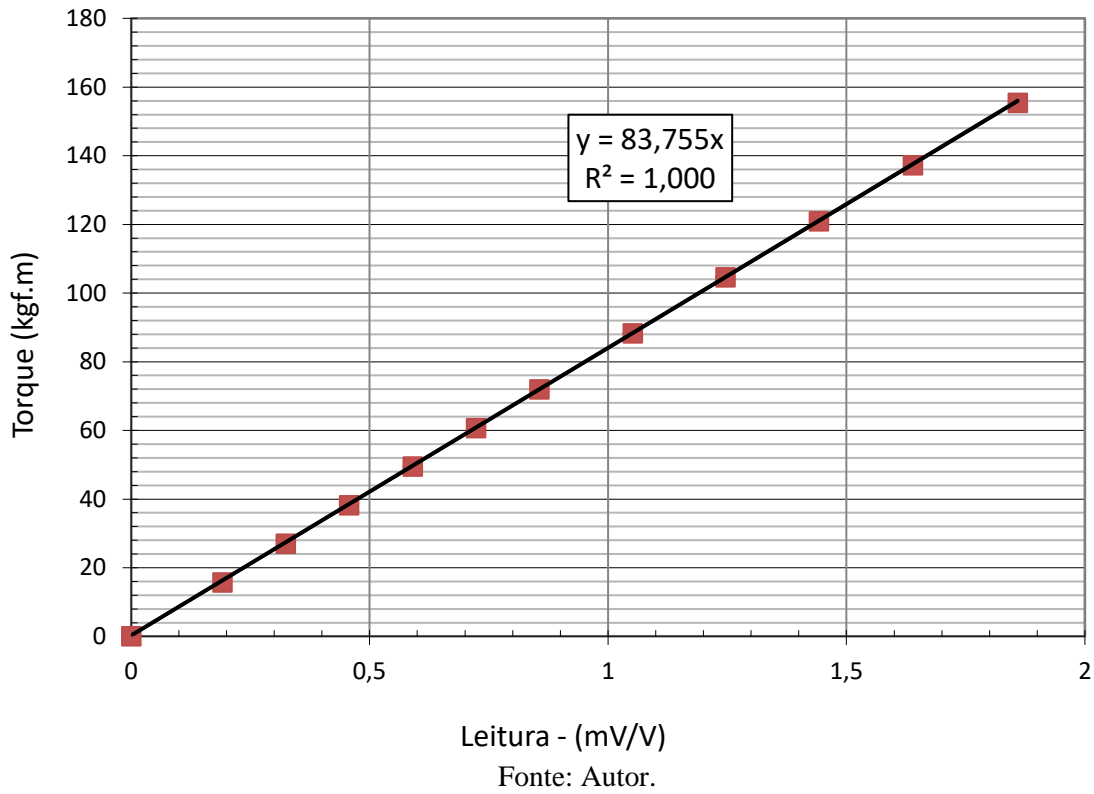


Figura 24: Curva de calibração da ESTACA 03.

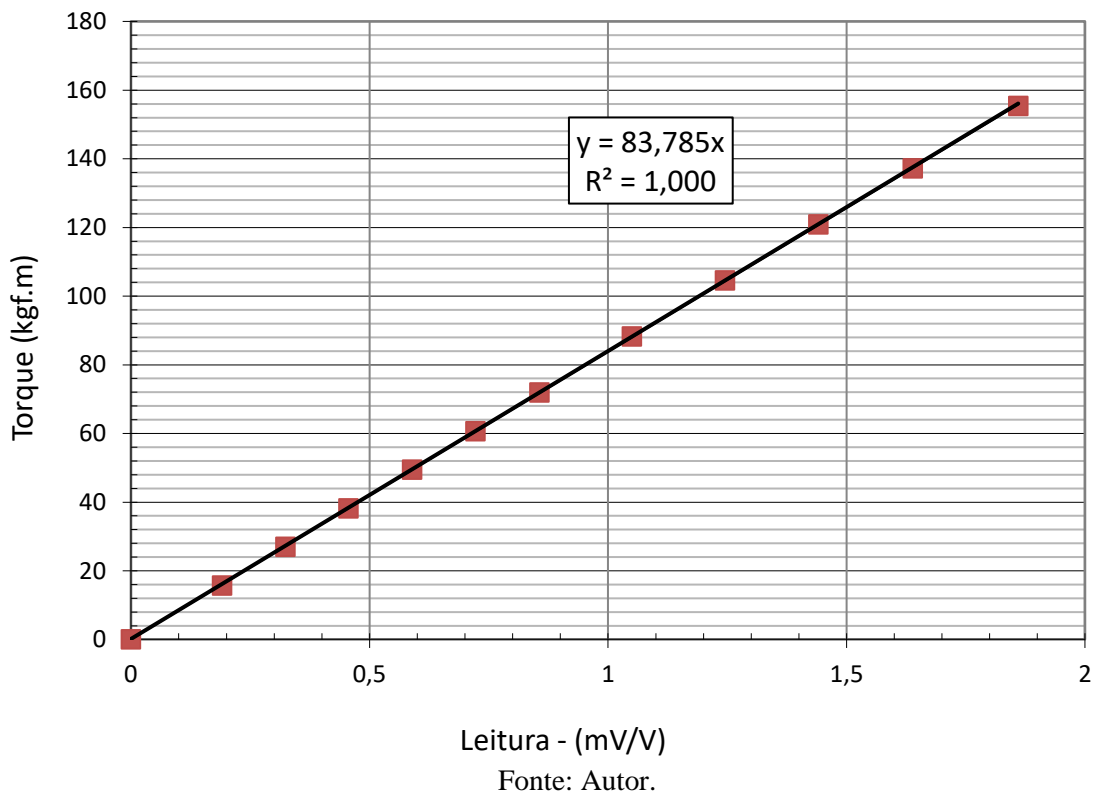


Figura 25: Curva de calibração da ESTACA 04.

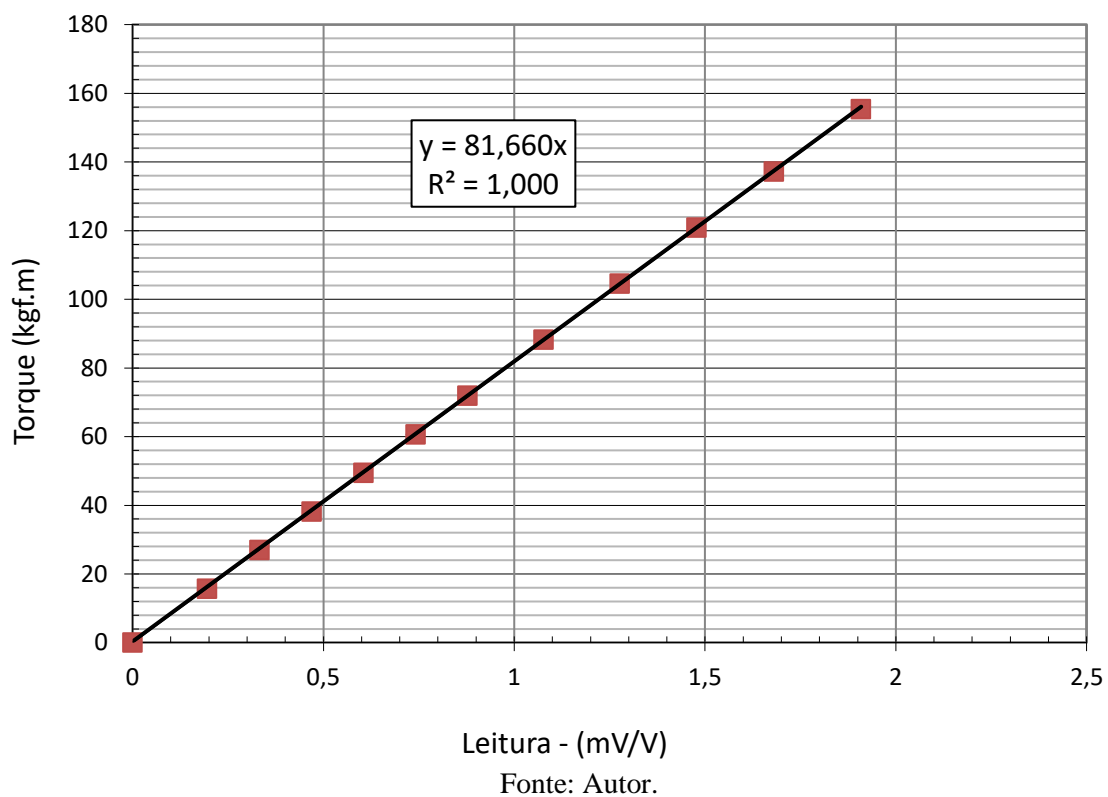


Figura 26: Curva de calibração da ESTACA 05.

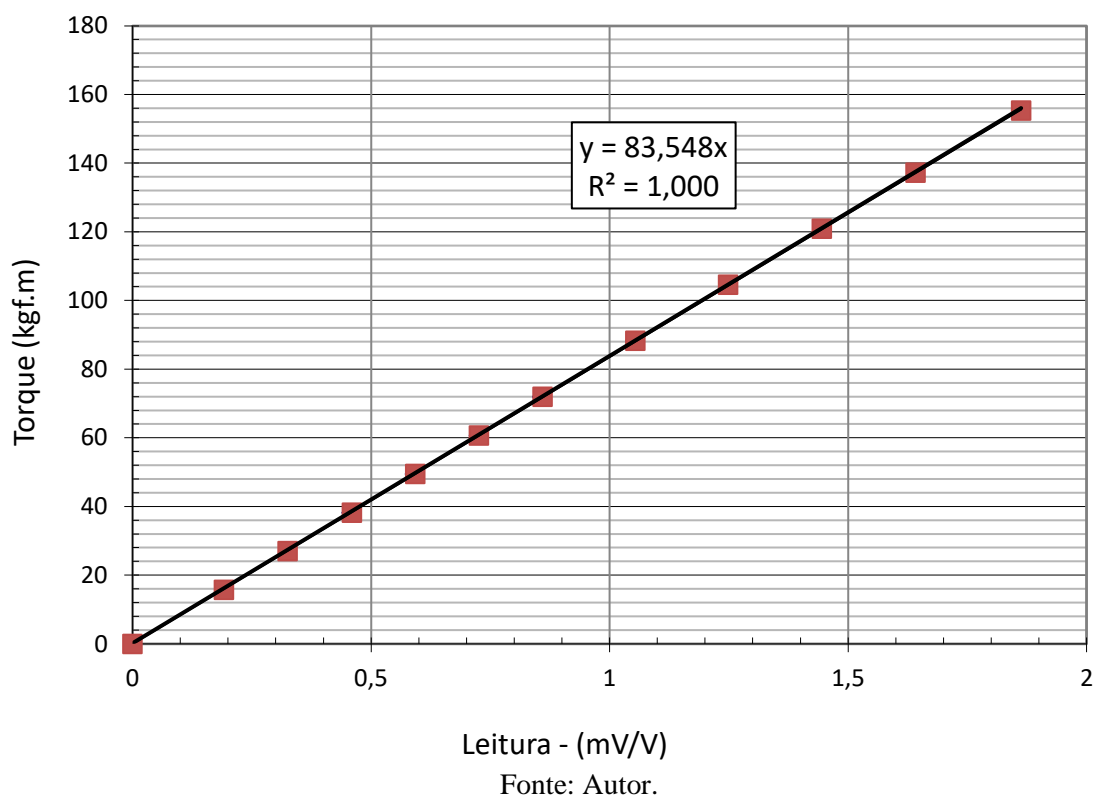




Figura 27: Curva de calibração da ESTACA 06.

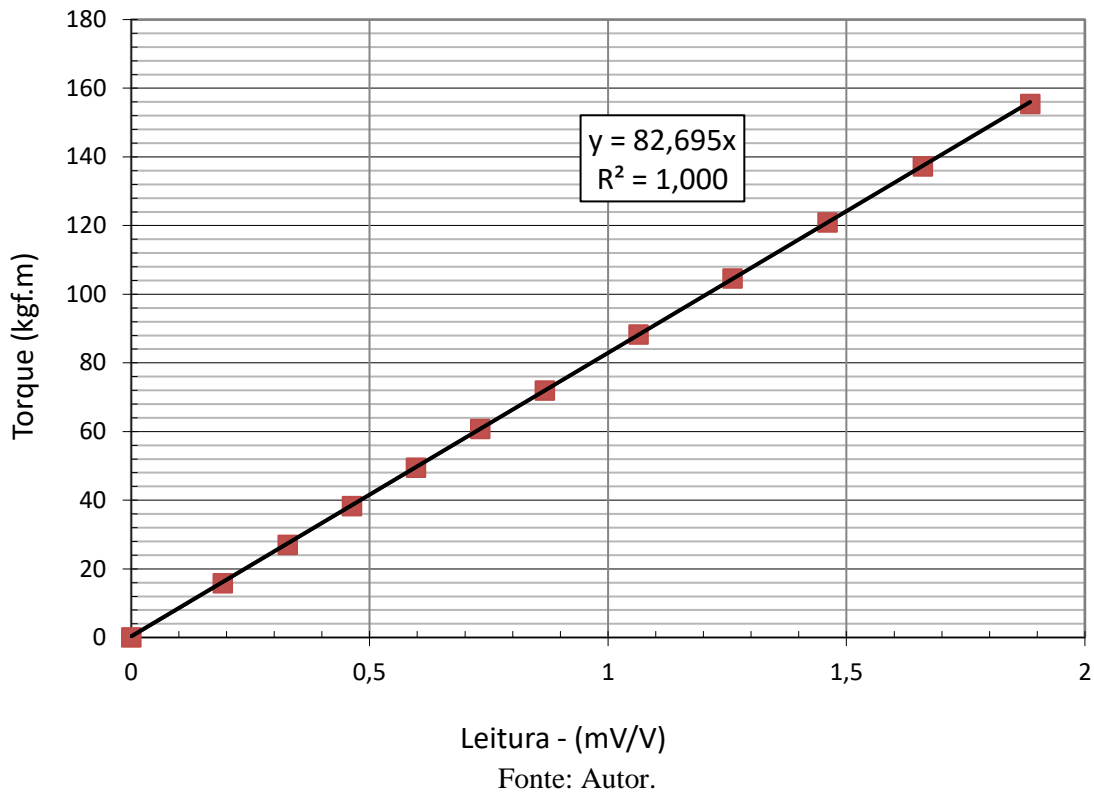


Figura 28: Curva de calibração da ESTACA 07.

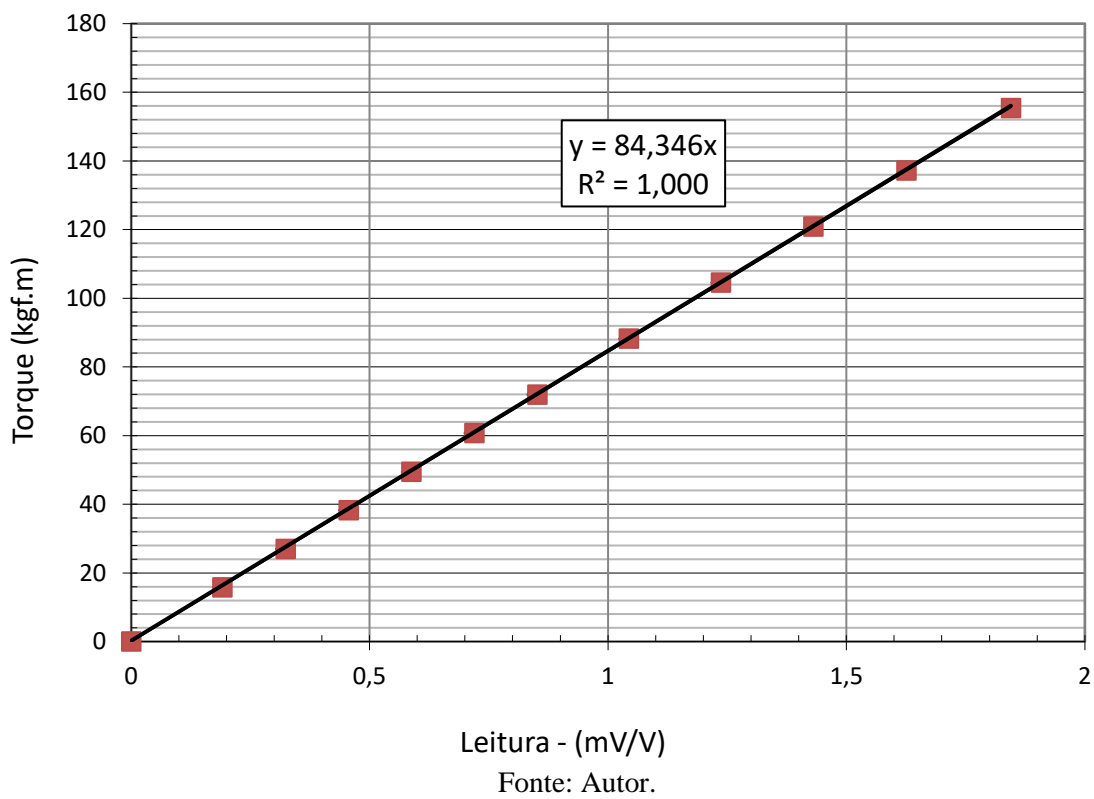


Figura 29: Curva de calibração da ESTACA 08.

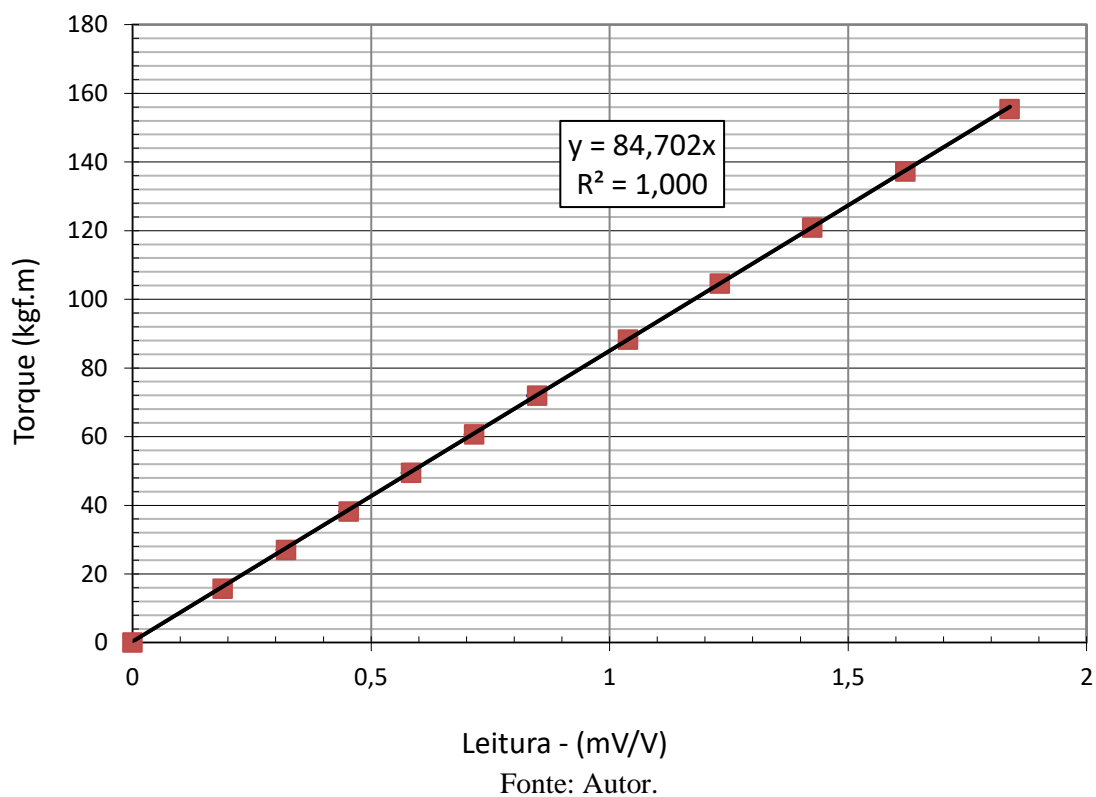
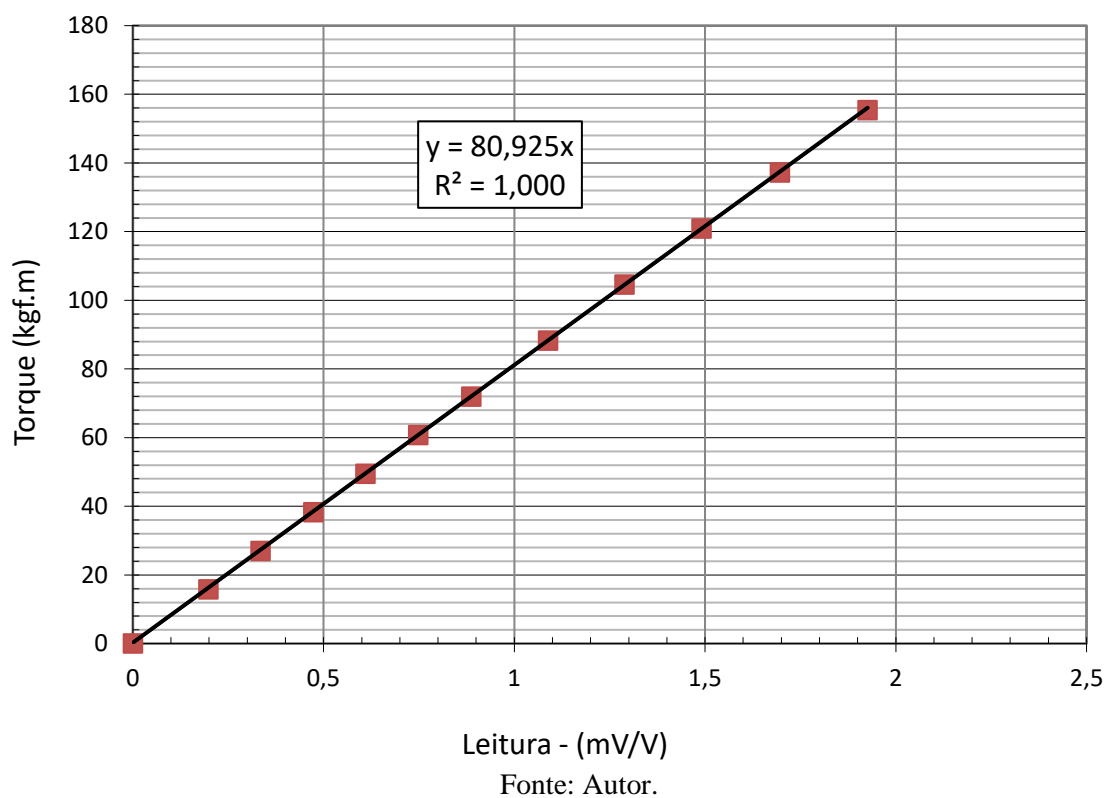


Figura 30: Curva de calibração da ESTACA 09.



## APÊNDICE D – Procedimento para montagem do “chuveiro”, execução da chuva de areia e fechamento da tampa.

O primeiro passo antes de se começar o ensaio é a deposição da areia de maneira uniforme e constante. Para que isso ocorra este procedimento mostra como foi feito a chuva de areia, para que a compactidade relativa da areia dentro do tanque seja igual (ou com 3% de diferença) em todos os ensaios. A primeira coisa a ser feita é a montagem do chuveiro, já que ele é uma estrutura desmontável de 2 partes, conforme mostra a figura 1.

Figura 1: Chuveiro desmontado.

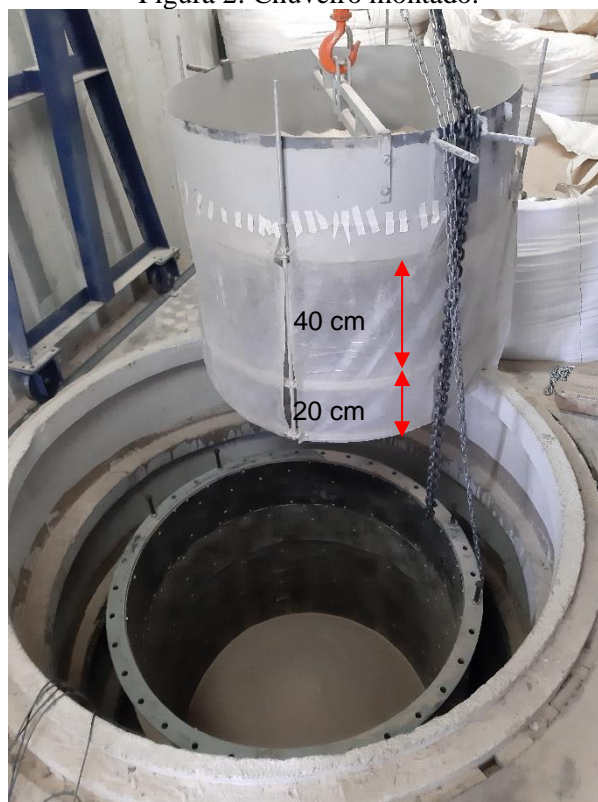


Fonte: Autor

Conforme mostra a figura 1 as duas partes do chuveiro são: o recipiente de armazenagem de areia (esquerda) e o difusor (direita). Para a montagem do chuveiro, era necessário o auxílio de um pórtico rolante e uma talha manual que encontrava-se dentro do contêiner. Primeiro, levanta-se o recipiente de armazenagem da areia e em seguida, posiciona-se o difusor em baixo do recipiente, de modo a encaixar as 4 barras rosqueadas em seus respectivos furos no recipiente de armazenagem. Após o encaixe desce-se o recipiente até que a altura da chapa furada do

recipiente e o tela de aço do difusor fique com 40 cm de altura. Quando chegava-se na altura de 40cm, rosqueava-se as porcas na barra rosqueada. Conferia-se também se as duas peneiras do difusor estavam 20 cm de distância entre elas. Por fim, usava-se uma tela de plástico ao redor da distância entre o recipiente e o difusor, conforme mostra a figura 2. Esta proteção era necessária para impedir que o fluxo de ar gerado no momento da chuva de areia, não atrapalhasse os jatos de areia que caíam do recipiente até o difusor, de modo que sempre caísse de maneira uniforme e lineares.

Figura 2: Chuveiro montado.



Fonte: Autor

Com o chuveiro montado, a primeira coisa a fazer é encher o recipiente superior com a areia já caracterizada. Usava-se uma pá de cereais para encher o balde de plástico de 10L e em seguida jogava-se a areia dentro do recipiente. Como o chuveiro era equilibrado apenas em um ponto pela talha manual, no centro do recipiente (ver figura 2), tomava-se o cuidado de encher diametralmente e depois no centro do recipiente. Com isso, certificava-se que o recipiente não enchia desalinhado. Com o recipiente cheio até o limite de sua altura, girava-se a manivela para que os furos das chapa soldados no recipiente e a chapa abaixo dela alinhava-se e a areia caía em forma de jato (figura 3).

Figura 3: Ensaio realizado com o chuveiro.



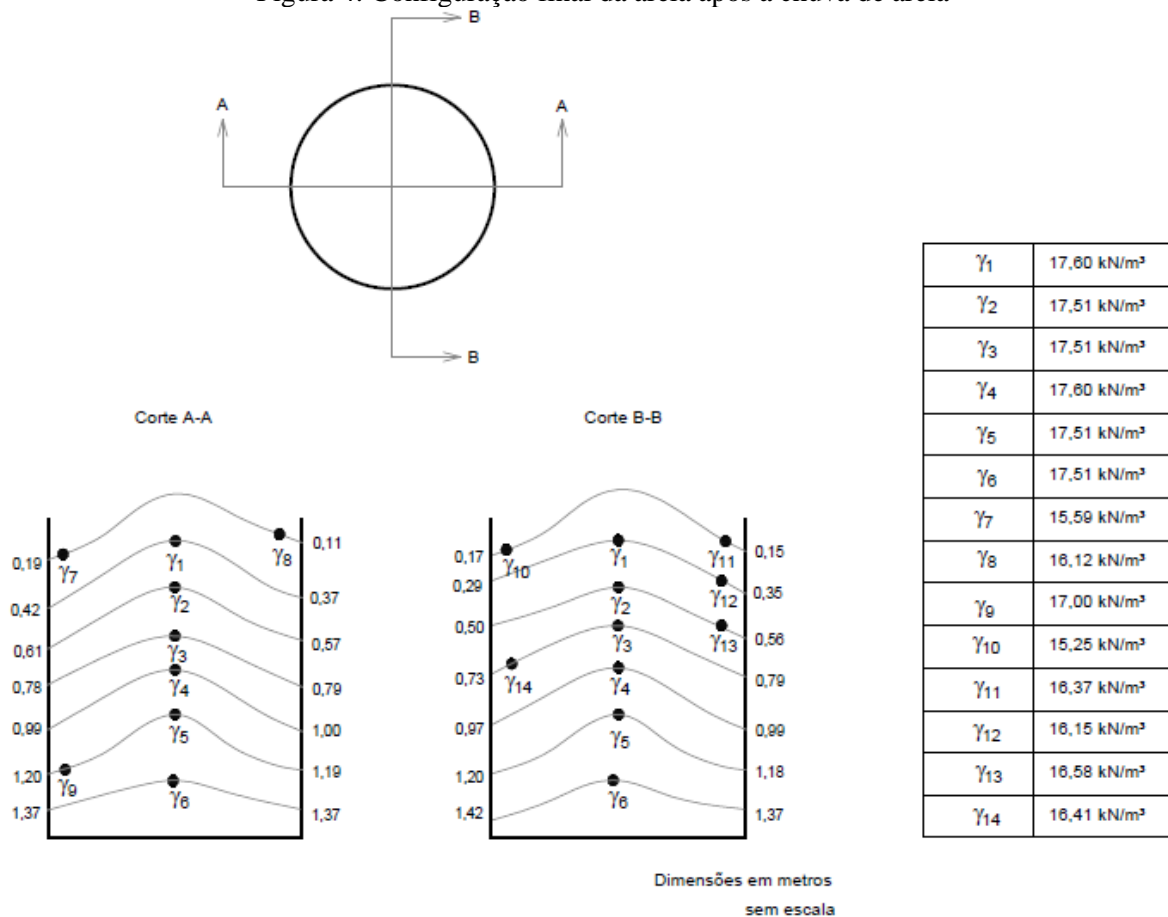
Fonte: Autor

Como pode ser visto na figura 3, a areia cai das aberturas circulares em jatos lineares e uniformes do recipiente até o difusor e, em seguida, cai por duas peneiras (difusor) localizadas imediatamente abaixo da placa de base. A compactação relativa da amostra resultante é controlada, para uma altura de queda fixada em no máximo 40 cm entre o topo da areia e o difusor.

Durante todo o processo da chuva de areia, verificou-se que a areia fica com uma configuração final em forma de cone, conforme mostra figura 4. Por conta disto, no final da chuva de areia, há um excesso de areia no centro da amostra que ultrapassa o topo da câmara de calibração. A primeira coisa que se faz é retirar este “excesso” de areia com a pá de cereais e voltar com ela

no Big Bag. Em seguida, nivela-se toda areia com uma régua de alumínio de 1,40 metros conforme mostra a figura 5.

Figura 4: Configuração final da areia após a chuva de areia



Fonte: Autor

Figura 4: Configuração final da areia durante e após passar a régua de alumínio

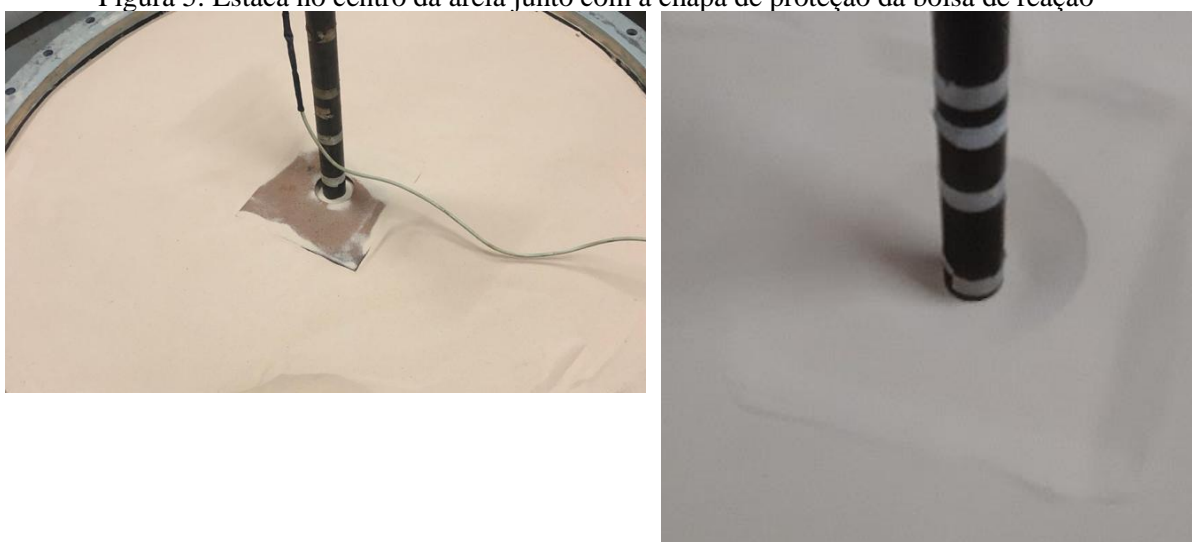


Fonte: Autor

Na mesma régua de alumínio, foi colado uma outra régua de alumínio com comprimento de 60 cm e espessura de 20 mm no meio dela. Foi feito isto, para executar um segundo nivelamento, para que o topo da areia fica-se 30 mm abaixo do topo da câmara de calibração. Esta é a medida certa para colocar a bolsa de reação e 2 mantas de borracha de mesmo diâmetro da bolsa de reação. Estas duas mantas de borrachas são colocadas para a proteção da bolsa de reação.

Após todo este processo, posicionava-se a estaca no meio da areia na câmara de calibração e coloca-se uma chapa de aço com 20 x 20cm e espessura de 5mm, conforme figura 5. Essa chapa tem a função de proteger a bolsa de reação, pois no início da instalação forma-se um cone vazio ao redor da estaca, também mostrada na figura 5.

Figura 5: Estaca no centro da areia junto com a chapa de proteção da bolsa de reação



Fonte: Autor

Em seguida, coloca-se uma manta de borracha com espessura de 5 mm e 1,20 de diâmetro, a bolsa de reação e outra manta de borracha. Antes de fechar a tampa, no furo central (entre a bolsa de reação e a estaca helicoidal) coloca-se uma peça metálica para evitar que a estaca encoste na parede de borracha do furo da bolsa de reação e danifique a bolsa. Esta peça metálica é mostrada na figura 6 sem a estaca para melhor visualização.

Por fim, tampa-se a câmara de calibração e parafusava-se toda a tampa. Antes de iniciar a instalação, tem-se que colocar uma peça de acrílico com um rolamento interno no centro da tampa para que a estaca descesse verticalmente. Dentro desta peça de acrílico encontra-se um rolamento, com diâmetro interno de 50 mm, ou seja, 7,8 mm maior que o da estaca (42,2mm), auxiliando a mesma a apenas fazer a rotação em volta do seu eixo. Na figura 7 mostra a peça de acrílico branca.

Figura 6: Detalhe final (sem a estaca) antes de fechar a tampa



Fonte: Autor

Figura 7: Detalhe final (com a estaca) após fechar a tampa





## **APÊNDICE E – Procedimento para execução dos ensaios triaxiais.**

### **1 Caracterização do ensaio:**

O ensaio de compressão triaxial convencional consiste em 2 etapas, a primeira etapa consiste na aplicação de estado hidrostático de tensões (fase de adensamento), a segunda etapa consiste de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico de solo (fase de cisalhamento).

Na etapa de adensamento hidrostático, coloca-se o corpo de prova dentro de uma câmara que será confinada e envolta por uma membrana de borracha. A câmara é então preenchida por água, à qual se aplica uma pressão, denominada de tensão confinante ( $\sigma'_3$ ), que atua em todas as direções. Deste modo, o corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões. Resumindo, aplica-se a tensão confinante e espera-se que a poro-pressão se dissipe.

Já na etapa de cisalhamento, aplica-se um carregamento axial por meio de um pistão no corpo de prova. A carga é medida por meio de um anel dinamométrico externo ou por uma célula de carga intercalada no pistão. Admitindo-se que não existem tensões de cisalhamento nas bases e nas geratrizes do corpo de prova, pode-se dizer que os planos horizontal e vertical são os planos principais. A tensão devida ao carregamento axial é denominada de tensão desviadora. Resumindo, após a dissipação da poro-pressão, mantendo-se constante a tensão de confinamento, a drenagem é aberta e aplicam-se incrementos de cargas axiais lentamente até que ocorra a ruptura. Assim, durante o carregamento, as tensões totais são iguais às tensões efetivas e a quantidade de água que sai indica a variação de volume do corpo de prova.

### **2 Concepção do ensaio:**

Foram realizados ensaios triaxiais CID em areia fina seca com tensões confinantes de 50, 100, 150 e 300 kPa no laboratório de Geotecnia da USP/EESC. Estas tensões foram escolhidas com base nos ensaios que ainda iriam ser feitos na câmara de calibração.

### 3 Equipamentos utilizados durante o ensaio:

Os equipamentos usados durante os ensaios foram:

- (1) Sistema triaxial: Paineis, coluna de mercúrio, manômetro, prensa e célula triaxial;
- (2) Medidores de volume; e
- (3) Sistema de aquisição de dados;

#### 3.1 Sistema Triaxial:

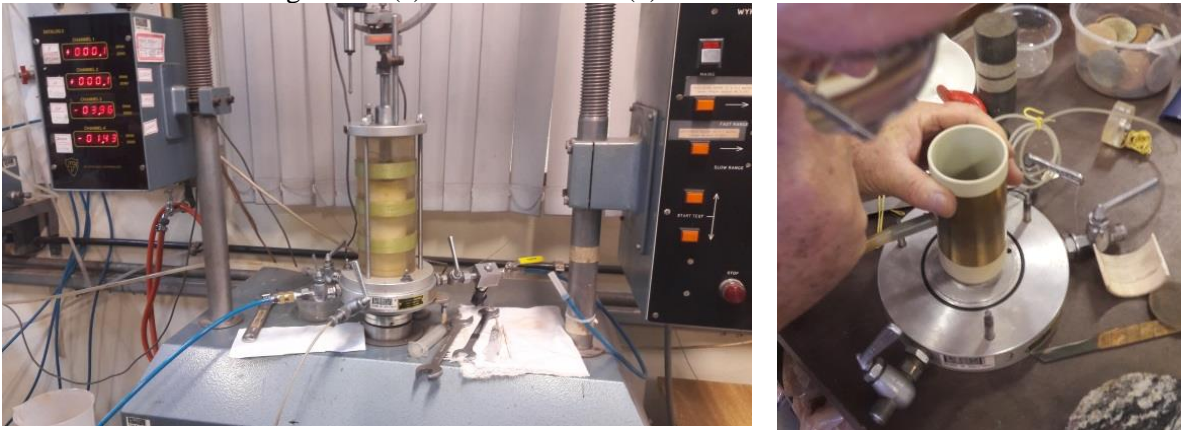
A prensa utilizada nos ensaios foram da Wykehan Farrance internacional (Figura 01). As células triaxiais são formadas por uma base e uma câmara de lucite. Cada câmara é equipada por um pedestal, uma pedra porosa, um cabeçote, um “O-ring” e uma membrana. O corpo de prova é montado na base da câmara, onde será feita, através de torneiras, a drenagem e a aplicação da pressão. A figura 02 mostra a célula de triaxial e os acessórios (pedra porosa, membrana e molde) utilizados durante o ensaio.

Figura 01: Prensa utilizada nos ensaios



Fonte: Autor.

Figura 02: (a) Célula triaxial e (b) Acessórios utilizados.



Fonte: Autor.

O painel do sistema triaxial é formado basicamente por válvulas, um êmbolo, e um manômetro analógico (Figura 03). As operações são, basicamente, aplicar uma pressão de ar comprimido através de um compressor de ar central, ou do êmbolo, e abrir e fechar as válvulas. O manômetro do painel registra a pressão de ar comprimido que está sendo aplicada, a qual está conectada com a tubulação central que é alimentada por um compressor de ar comprimido.

Figura 03: Painel do sistema triaxial e válvulas de controle de pressão.



Fonte: Autor.

O sistema de aplicação da força também é realizado através de ar comprimido que estão ligadas ao manômetro do painel, onde estão registradas as pressões aplicadas (figura 03).

### 3.2 Medidor de volume:

Conforme mostra a figura 04, o medidor é da Wykehan Ferrance Internacional, modelo 17044 e possui capacidade de pressão máxima de 1700 kN/m<sup>2</sup>. O medidor é conectado na base da célula triaxial, tem a função de receber a água da drenagem. Ele possui um LVDT em cima do pistão que indica o nível de água dentro da câmara. A variação de volume dentro da câmara triaxial é indicado pelo LVDT.

Figura 04: Medidor de volume.



Fonte: Autor.

### 3.3 Sistema de aquisição de dados:

O sistema de aquisição de dados automático (DATALOG 2) foi desenvolvido pela Wykeham Ferrance (figura 05). O DATALOG 2 permite a aquisição de dados dos ensaios simultaneamente. O sistema é composto por 4 canais, associado a um programa de aquisição no computador (desenvolvido pelo laboratório de Geotecnia da USP/EESC), que permite a visualização dos gráficos de adensamento e de ruptura.

Figura 05: Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autor.

### 3.4 Preparação dos corpos de prova:

Para moldagem do corpo de prova foi determinado previamente que a areia a ser ensaiada seria uma areia compacta com compacidade relativa de aproximadamente 100% a determinada pela norma ABNT, podendo variar entre 95% e 100%. Foi utilizado um molde bipartido com diâmetro interno de 5,0 cm e altura de 12,50 cm, conforme mostra figura 06.

Figura06: Molde bipartido.



Fonte: Autor.

Após a colocação da areia dentro do molde, houve a aplicação de vácuo dentro do corpo de prova (figura 07), para manter o corpo de prova moldado. O vácuo foi imposto ao corpo de

prova através de uma bomba de vácuo ligada a um manômetro. Assim, a pressão indicada no manômetro corresponde à sucção aplicada no corpo de prova, que no presente estudo foi de aproximadamente  $12,7 \text{ kN/m}^2$ , para todos os corpos moldados. A sucção somente foi retirada após a aplicação da tensão confinante.

Figura 07: Corpo de prova com vácuo aplicado.



Fonte: Autor.

### 3.5 Ensaio triaxial:

Após a montagem do corpo de prova iniciou-se o processo para execução do ensaio triaxial. Antes de do início do ensaio, encheu-se a câmara triaxial com água destilada, expulsando todo o ar da câmara pelo respiro da câmara e aplicava-se a tensão confinante (com o respiro já fechado), que no presente estudo foram de 50, 100, 150 e 300 kPa. As pressões eram sempre conferida no manômetro. Após a abertura da válvula de pressão na base da câmara, as válvulas do vácuo e da drenagem eram abertas, dando início a fase de adensamento.

O adensamento durou em média 1 hora, pois, era colocado durante o horário de almoço. Passado a fase de adensamento, deu-se início a fase de cisalhamento. A velocidade de cisalhamento imposta foi previamente definida com  $0,2 \text{ mm/min}$ .