

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Álec Goulart Monteiro

**CONCEPÇÃO E MONTAGEM DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE  
ARRANCAMENTO DE CORRENTES DE LINHAS DE ANCORAGEM DE  
PLATAFORMAS OFFSHORE**

Florianópolis  
2024

ÁLEC GOULART MONTEIRO

**CONCEPÇÃO E MONTAGEM DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE  
ARRANCAMENTO DE CORRENTES DE LINHAS DE ANCORAGEM DE  
PLATAFORMAS OFFSHORE**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade  
Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção  
do título de Engenheiro Civil  
Orientador: Prof. Naloan Coutinho Sampa, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Monteiro, Álec Goulart

Concepção e montagem de um equipamento para ensaios de arrancamento de correntes de linhas de ancoragem de plataformas offshore / Álec Goulart Monteiro ; orientador, Naloan Coutinho Sampa, 2024.

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. interação solo-corrente. 3. modelagem física. 4. resistência ao arrancamento. 5. ensaio experimental. I. Sampa, Naloan Coutinho. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Álec Goulart Monteiro

**Concepção e montagem de um equipamento para ensaios de arrancamento de correntes  
de linhas de ancoragem de plataformas offshore**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 16 de agosto de 2024

---

Prof. Liane Ramos da Silva, Dra.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Naloan Coutinho Sampa, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Rafael Cassimiro Barbosa, MSc.  
Avaliador (Universidade Federal de Santa Catarina)

---

Bruno Karasiak Meneguz, MSc.  
Avaliador (Universidade Federal de Santa Catarina)

---

Bianca de Córdova Caetani, Eng.  
Avaliadora (Universidade Federal de Santa Catarina)

Este trabalho é dedicado à minha família, minha esposa Michele e meu filho amado Caetano.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo apoio em todos os sentidos. Aos meus pais, Vera e Luis e minha irmã Dana. A minha esposa Michele e nosso amado filho Caetano.

A todos os professores, em especial ao Professor Naloan Sampa que tornou o todo o trabalho possível com seu entusiasmo e disposição.

Aos colegas de curso e de estágios, engenheiros e servidores que contribuíram com sua experiência ao longo dos últimos anos.

Ao meu amigo e colega Vinicius Pinheiro que foi vital para o desenvolvimento de toda a programação do equipamento e montagem dos componentes eletrônicos.

À Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar uma grande oportunidade à mim e muitos outros.

## RESUMO

A descoberta da camada do pré-sal foi crucial para a expansão da Petrobras e o aumento da produção de derivados de hidrocarbonetos, mas também trouxe desafios significativos que exigem o desenvolvimento contínuo de métodos e tecnologias para exploração *offshore* e ancoragem de plataformas. No campo das fundações de plataformas flutuantes, é vital compreender a interação entre o solo marinho e as correntes utilizadas nas linhas de ancoragem. Embora estudos anteriores tenham avançado nesse entendimento, ainda existem lacunas que precisam ser investigadas em laboratório por meio de ensaios em modelos reduzidos. Este trabalho visa conceber e montar um equipamento para ensaios de arrancamento de correntes, em escala reduzida. Projetos detalhados, incluindo desenhos técnicos e projeto de instrumentação, foram elaborados com base em estudos anteriores, especialmente os de Rocha (2014) e Sampa (2015 e 2019). A partir desse projeto, componentes do aparato experimental foram fabricados e adquiridos, resultando na montagem de um equipamento simples, eficiente, econômico e seguro. Ensaios de arrancamento foram realizados em solo arenoso com correntes de diferentes diâmetros e comprimentos para avaliar e validar o funcionamento do equipamento. Os resultados foram satisfatórios, demonstrando um bom comportamento carga-deslocamento e a precisão do aparato experimental. Conclui-se que pequenos ajustes são necessários antes da aplicação ampla do equipamento em pesquisas futuras.

**Palavras-chave:** interação solo-corrente, resistência ao arrancamento, modelagem física, ensaio experimental.

## ABSTRACT

The discovery of the pre-salt layer was pivotal for Petrobras's expansion and increased hydrocarbon production. However, it also introduced significant challenges, necessitating the ongoing advancement of offshore exploration and platform anchoring technologies. Understanding the interaction between the seabed and chains used in floating platform foundations is essential. Despite progress in previous studies, gaps remain that require laboratory investigation through reduced-scale model tests. This study focuses on designing and constructing equipment for reduced-scale chain pullout tests. Detailed designs, including technical drawings and instrumentation plans, were developed based on prior research by Rocha (2014) and Sampa (2015, 2019). The experimental setup was assembled using manufactured and acquired components, resulting in equipment that is simple, efficient, economical, and safe. Pullout tests conducted with chains of varying diameters and lengths in sandy soil validated the equipment's performance, showing satisfactory load-displacement behavior and accuracy. Minor adjustments are recommended before broader application in future research.

**Keywords:** soil-chain interaction, pullout resistance, physical modeling, experimental testing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Recordes mundiais na produção de petróleo em ambientes offshore – 1979 a 2012. ....	17
Figura 2 - Diversos tipos de plataformas utilizadas em áreas offshore.....	18
Figura 3 - Principais tipos de conectores utilizados para unir os componentes das linhas de ancoragem.....	20
Figura 4 - Principais tipos de estacas e âncoras. ....	21
Figura 5 - Configurações de linhas de ancoragem e elementos sistemas de ancoragem. ....	22
Figura 6 - Cargas atuantes na plataforma e nas linhas de ancoragem.....	24
Figura 7 - Esquema do aparato experimental.....	25
Figura 8 - Esquema do aparato experimental.....	27
Figura 9 - Esquema do aparato experimental.....	27
Figura 10 - Geometria de um elo de corrente e o esquema do aparato experimental.....	28
Figura 11 – Parcelas de resistências mobilizadas durante o arrancamento de correntes. ....	29
Figura 12 - Forma de elementos de ligação. ....	29
Figura 13 - Esquema do aparato de ensaios. ....	29
Figura 14 – Representação de um elo de corrente e a imagem da corrente utilizada.....	30
Figura 15 - Esquema do equipamento de ensaios. ....	30
Figura 16 - Esquema do aparato experimental.....	31
Figura 17 – Representação do elo da corrente utilizado. ....	32
Figura 18 - Esquema do aparato de arrancamento. ....	32
Figura 19 - Aparato experimental para correntes verticais deslocados longitudinalmente.....	33
Figura 20 - Aparato experimental para correntes horizontais deslocados longitudinalmente.....	34
Figura 21 - Aparato experimental para correntes horizontais deslocados transversalmente.....	34
Figura 22 - Aparato desenvolvido para ensaio de arrancamento de correntes.....	36
Figura 23 – Representação 3D do aparato experimental.....	36
Figura 24 - Guias para as anteparas montadas nas laterais do tanque.....	37

Figura 25 - Esquema do tanque montado com as anteparas.....	38
Figura 26 – Representação 3D do tanque de madeira com os compartimentos.....	38
Figura 27 - Projeto da estrutura de suporte (Medidas em mm).....	39
Figura 28 – Representação em 3D da estrutura de suporte. ....	39
Figura 29 – Correntes de aço com diâmetro nominal de 3 mm , 4 mm e 5 mm .....	40
Figura 30 - Elementos de medida dos elos.....	41
Figura 31 - Sistema de travamento inferior das correntes, travado a esquerda e liberado a direita. ....	42
Figura 32 - Trava superior.....	42
Figura 33 – Estrutura de suporte do sistema de arrancamento (Medidas em mm). ...	43
Figura 34 - Base para instalação dos equipamentos.....	44
Figura 35 - Cilindro pneumático normalizado. ....	44
Figura 36 - Válvula de controle do tipo 5/3 vias.....	45
Figura 37 - Válvula pneumática reguladora de fluxo e mangueira PU.....	46
Figura 38 - Compressor de ar e filtro regulador.....	46
Figura 39 – Representação de fixadores.....	47
Figura 40 - Peça de ligação entre o cilindro e LVDT. ....	48
Figura 41 - Peça confeccionada com parafuso para fixação do fio no pistão. ....	48
Figura 42 - Transdutor linear de posição.....	49
Figura 43 - Célula de carga tipo S.....	49
Figura 44 - Placa Arduino R3.....	50
Figura 45 - Módulo amplificador HX711. ....	50
Figura 46 - Relé 2 canais 5v-220v 10A.....	51
Figura 47 - Caixa para a montagem dos componentes eletrônicos. ....	51
Figura 48 - Fabricação do estrutura do tanque. ....	53
Figura 49 - Montagem das rodas e fabricação do suporte do cilindro. ....	54
Figura 50 - Guias para anteparas e base do cilindro pneumático.....	54
Figura 51 - Equipamento montado e acessórios conectados.....	55
Figura 52 - À esquerda tanque selado, no centro a corrente fixada e à direita o início do enchimento. ....	57
Figura 53 –A esquerda o enchimento, no centro a fixação e a direita o alinhamento do tanque. ....	58
Figura 54 - Carga x Deslocamento - $D_c = 3$ mm.....	61
Figura 55 - Carga x Deslocamento - $D_c = 4$ mm.....	61

Figura 56 - Carga x Deslocamento - $D_c = 5$ mm.....	62
Figura 57 - Tensão x Deslocamento - $D_c = 3$ mm.....	63
Figura 58 - Tensão x Deslocamento - $D_c = 4$ mm.....	63
Figura 59 - Tensão x Deslocamento - $D_c = 5$ mm.....	64
Figura 60 - Carga de pico × Diâmetro nominal.....	65
Figura 61 - Carga de pico × Comprimento.....	66
Figura 62 - Carga residual × diâmetro nominal.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das medidas das correntes utilizadas.....	41
Tabela 2 – Resumo das cargas de pico e residual medidos nos ensaios. ....	62
Tabela 3 - Relação do diâmetro nominal D com a carga de ruptura $Q_p$ . ....	65
Tabela 4 - Relação do comprimento L com a carga de ruptura $Q_p$ .....	66
Tabela 5 - Relação do diâmetro nominal D com a carga residual $Q_r$ . ....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
FPS	<i>Floating Production System</i>
TLP	<i>Tension Leg Platforms</i>
FPSO	<i>Floating Production, Storage, And Offloading</i>
SPAR	<i>Single Point Anchor Reservoir</i>
SPM	<i>Single Point Mooring</i>
CALM	<i>Catenary Anchor Leg Mooring</i>
SALM	<i>Single Anchor Leg Mooring</i>
DP	<i>Dynamic Positioning</i>
VLA	<i>Vertical Load Anchor</i>
SEPLA	<i>Suction Embedded Plate Anchor</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
PU	Poliuretano
VDC	<i>Volts Direct Current</i>
F.S	<i>Full Scale</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
1.2	ORGANIZAÇÃO Do Trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>17</b>
2.1	Estruturas de exploração em ambientes offshore .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Plataformas Flutuantes .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sistema de Amarração .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Sistemas de Ancoragem.....</b>	<b>19</b>
2.1.3.1	<i>Linhas de Ancoragem .....</i>	<i>19</i>
2.1.3.2	<i>Conectores .....</i>	<i>20</i>
2.1.3.3	<i>Âncoras e Estacas.....</i>	<i>20</i>
<b>2.1.4</b>	<b>Configurações de Linhas de Ancoragem .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Cargas Ambientais.....</b>	<b>23</b>
2.2	Ensaio de arrancamento longitudinal de correntes.....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Yen e Tofani (1984).....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Degenkamp e Dutta (1989).....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Bang, Taylor, Yu e Kim (1996).....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Bang, Richardson, Cho e Kim (2003) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Kwon (2010) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Choi, Kim, Kwon e Youn (2014) .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Rocha (2014) e Sampa (2015).....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Kim (2017) .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.9</b>	<b>Sampa (2019).....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>

3.1	Concepção do aparato experimental.....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Sistema para acondicionamento do solo.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Correntes de aço.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Sistema de travamento de correntes.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Sistema de arrancamento.....</b>	<b>43</b>
3.1.4.1	<i>Estrutura de suporte de arrancamento.....</i>	43
3.1.4.2	<i>Cilindro pneumático.....</i>	44
3.1.4.3	<i>Válvula de controle.....</i>	45
3.1.4.4	<i>Válvulas reguladoras de fluxo e mangueiras pneumáticas.....</i>	45
<b>3.1.5</b>	<b>Compressor.....</b>	<b>46</b>
3.1.5.1	<i>Fixadores.....</i>	47
3.1.5.2	<i>Ponteira para o cilindro.....</i>	47
<b>3.1.6</b>	<b>Sistemas de medição, de comando e de aquisição.....</b>	<b>48</b>
3.1.6.1	<i>Transdutor Linear de posição.....</i>	48
3.1.6.2	<i>Célula de carga.....</i>	49
3.1.6.3	<i>Placa Arduino.....</i>	50
3.1.6.4	<i>Módulo conversor/amplificador.....</i>	50
3.1.6.5	<i>Relés.....</i>	51
3.1.6.6	<i>Caixa para instalação dos componentes eletrônicos.....</i>	51
3.1.6.7	<i>Software.....</i>	52
3.2	Construção e montagem do equipamento.....	53
3.3	materiais e métodos de ensaio.....	56
<b>3.3.1</b>	<b>Descrição da areia.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio de Arrancamento de Corrente.....</b>	<b>57</b>
3.3.2.1	<i>Preparação dos tanques de ensaios.....</i>	57
3.3.2.2	<i>Realização dos ensaios.....</i>	59

<b>4</b>	<b>Validação do equipamento.....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>68</b>
5.1	Conclusões.....	68
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE 1 - SCRIPT DESENVOLVIDO PARA O ARDUINO .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE 2 - CÓDIGO PYTHON PARA CONTROLE E SALVAMENTO.....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Embora novas fontes de geração de energia elétrica tenham surgido, o consumo de derivados de hidrocarbonetos continua a crescer, impulsionando a sua exploração em áreas offshore distantes da costa e de difícil acesso. Essas áreas, caracterizadas por águas profundas e ultraprofundas, exigem o uso de plataformas flutuantes para a perfuração, produção, processamento e armazenamento de hidrocarbonetos, com foco em eficiência, economia e segurança (Morais, 2013).

As correntes de aço, utilizadas como linhas de ancoragem para conectar plataformas flutuantes a elementos de fundação enterrados no solo marinho, desempenham um papel crucial devido à sua geometria e alta resistência. Geralmente, elas são posicionadas nas extremidades das linhas, com uma parte enterrada no solo marinho.

Compreender o mecanismo de interação entre o solo marinho e a corrente enterrada é essencial, pois isso influencia a instalação de âncoras, a configuração da catenária invertida e o desempenho dos elementos de fundação. Estudos anteriores como os de Yen e Tofani (1984), Kim (2017), Rocha (2014) e Sampa (2015), entre outros, que incluíram ensaios experimentais e numéricos, avançaram significativamente na compreensão do comportamento das correntes enterradas.

No entanto, ainda há lacunas no conhecimento que precisam ser exploradas, consideradas relevantes para pesquisas da Petrobras e outras empresas do setor. A geometria complexa das correntes e a dificuldade de monitorar sua trajetória no solo marinho são desafios significativos nesse campo de estudo.

Diante da importância de entender essa interação para aprimorar os procedimentos de instalação de estacas e as metodologias de cálculo de capacidade de carga, este trabalho propõe conceber e montar um aparato experimental no laboratório para realizar ensaios de arrancamento. Além disso, este estudo visa também aprimorar as infraestruturas de pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC para futuros estudos relacionados a fundações offshore.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é conceber e montar um aparato experimental eficiente e econômico para ensaios de arrancamento de correntes de linha de ancoragem de plataformas *offshore*, visando seu uso em estudos futuros sobre o mecanismo de interação entre solo e corrente.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Conceber um projeto detalhado, eficiente e econômico de um aparato experimental para ensaios de arrancamento de correntes;
- Fabricar, adquirir e montar as partes do aparato experimental;
- Selecionar e coletar amostras de areias finas na região de Grande Florianópolis adequadas para estudos de interface solo-corrente;
- Realizar ensaios de arrancamento para validar o desempenho do aparato experimental.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- I. Introdução: apresenta os princípios orientadores deste trabalho, incluindo a problemática, as justificativas e os objetivos. Este item também explica brevemente a organização do trabalho;
- II. Fundamentação Teórica: explora os conceitos fundamentais relacionados às estruturas de exploração em ambientes offshore, além de revisar os principais estudos laboratoriais focados na análise da interação solo-corrente;
- III. Metodologia: descreve o projeto do aparato experimental para ensaios de arrancamento de correntes, detalhando os equipamentos e materiais utilizados. Também aborda os procedimentos adotados para a montagem do equipamento no laboratório, além de explicar em detalhes as etapas de preparação dos tanques de ensaio e a execução dos experimentos;
- IV. Validação do Equipamento: apresenta os resultados dos ensaios de arrancamento realizados para validar o funcionamento do aparato experimental;
- V. Considerações Finais: resume as conclusões e os principais resultados do trabalho, refletindo o conhecimento adquirido. Ao final do capítulo, são enumeradas sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas, os apêndices e os anexos.

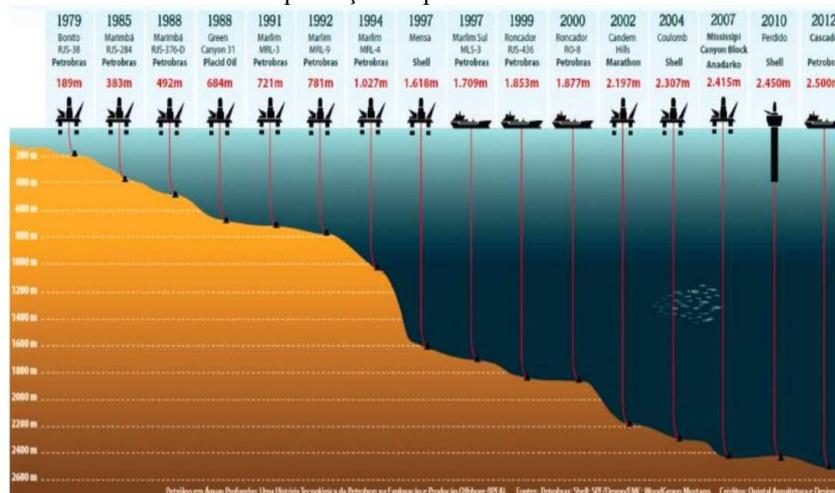
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os conceitos fundamentais relacionados às estruturas de exploração em ambientes *offshore*, além de apresentar os principais estudos realizados em laboratório para a análise da interação solo-corrente, visando identificar e definir os elementos essenciais para a concepção e montagem de um aparato experimental no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC.

### 2.1 ESTRUTURAS DE EXPLORAÇÃO EM AMBIENTES OFFSHORE

O crescente consumo global de derivados de petróleo impulsionou a exploração destes para ambientes offshore de águas profundas e ultra profundas, com lâmina de água superando 7000 m. No Brasil, verifica-se uma situação semelhante liderada pela Petrobrás e impulsionada pela busca da autossuficiência energética. A Figura 1 apresenta recordes mundiais na produção de petróleo em ambientes offshore, no período de 1979 a 2012 (Morais, 2013).

Figura 1 - Recordes mundiais na produção de petróleo em ambientes offshore – 1979 a 2012.



Fonte: Morais (2013).

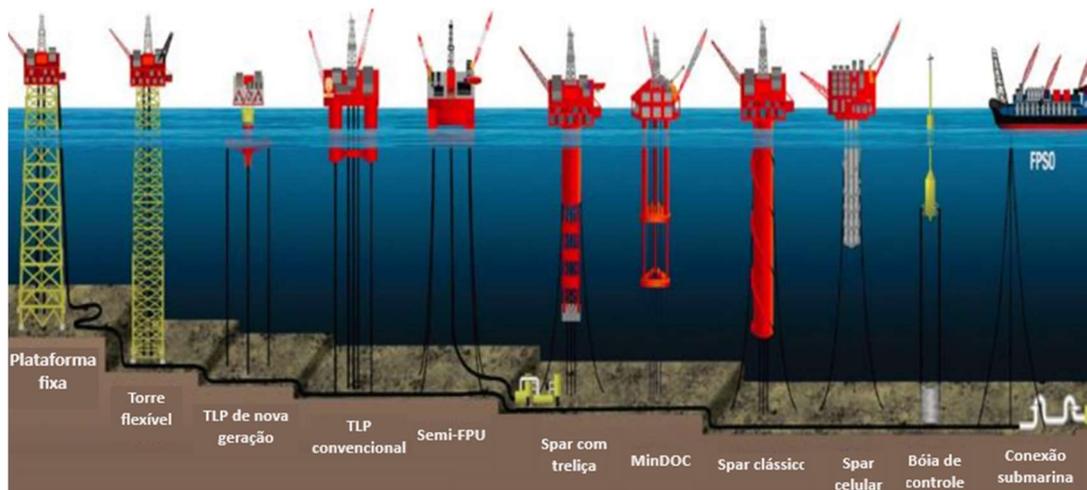
As atividades de exploração de hidrocarbonetos em ambientes *offshore* apresentam uma série de desafios tecnológicos e logísticos para a indústria petrolífera. Na área de geotecnia, os principais desafios incluem a realização de investigações geotécnicas, o transporte e a instalação de elementos de fundação, bem como o dimensionamento de fundações capazes de garantir a estabilidade das estruturas e resistir aos esforços impostos pelo ambiente (Morais, 2013; Sampa, 2019).

Randolph *et al.* (2005) afirmam que as características ambientais e geotécnicas dos ambientes offshore exigem adaptações nas abordagens de projeto dos sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes. Como resultado, houve a transição de plataformas fixas para flutuantes, o desenvolvimento de novos tipos de fundações e técnicas de instalação, a criação de materiais para linhas de ancoragem e o estudo de novas abordagens sobre o desempenho dos elementos de fundação.

### 2.1.1 Plataformas Flutuantes

As plataformas são amplamente utilizadas em todo o mundo como alternativas técnica e economicamente viáveis para diversas funções, como perfuração, produção, bombeamento, processamento e armazenamento de petróleo. Em ambientes de águas profundas e ultraprofundas, é comum o uso de plataformas semissubmersíveis (FPS), TLP (*Tension Leg Platforms*), FPSO (*Floating Production, Storage, and Offloading*) e SPAR (Hernández, 2004; Randolph *et al.*, 2005; API, 2006; Kunitaki, 2006; Morais, 2013). A Figura 2 ilustra diferentes tipos de plataformas, incluindo as fixas e flutuantes.

Figura 2 - Diversos tipos de plataformas utilizadas em áreas offshore.



Fonte: Morais (2013).

### 2.1.2 Sistema de Amarração

Em águas profundas e ultraprofundas, a estabilidade das estruturas flutuantes é assegurada por sistemas de amarração, que incluem:

- I. *Single Point Mooring* (SPM): é um sistema que centraliza as linhas de ancoragem em um único ponto, que pode estar localizado dentro ou fora da embarcação. Esse sistema pode utilizar as configurações CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*), SALM (*Single Anchor Leg Mooring*) ou ancoragem com *turret*;
- II. *Spread Mooring* (SM): É um sistema que distribui as linhas de ancoragem ao redor do navio FPSO ou FSO, sendo geralmente utilizado em ambientes menos agressivos;
- III. *Dynamic Positioning* (DP): É um sistema que utiliza propulsores e impulsadores laterais para posicionar plataformas com grandes deslocamentos (*offset*), sendo comumente empregado em estruturas destinadas à perfuração e com pouco tempo de permanência no ambiente *offshore*. Em muitas situações, trabalha em conjunto com outros sistemas de ancoragem.

### 2.1.3 Sistemas de Ancoragem

Os sistemas de ancoragem são projetados para manter as estruturas flutuantes na posição desejada, resistindo e equilibrando as forças impostas pelo ambiente offshore, como correntes, ondas, vento e marés, além das cargas geradas pelas atividades de exploração na estrutura flutuante e nas linhas de ancoragem. Esses sistemas são compostos por três principais componentes: linhas de ancoragem, conectores e âncoras (Yen e Tofani, 1984; Vryhof Anchors, 2010; Dean, 2010).

#### 2.1.3.1 Linhas de Ancoragem

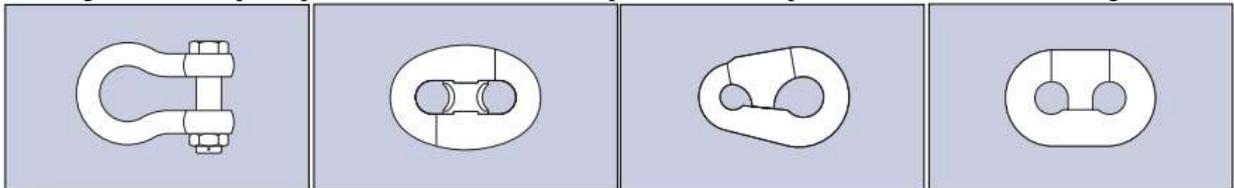
As linhas de ancoragem conectam plataformas *offshore* ou *risers* aos elementos de fundação enterrados no solo marinho (Oliveira, 2009). Podem ser feitas de diferentes materiais, como correntes de aço (amarras de aço), cabos de aço e cabos sintéticos, como poliamida e poliéster. Fatores relevantes na seleção dessas linhas incluem instabilidade, resistência à corrosão, terminação de linha, fadiga e durabilidade (Vryhof Anchors, 2010).

Em águas rasas, geralmente utiliza-se um único tipo de material para as linhas de ancoragem. Em águas profundas e ultraprofundas, combinam-se diferentes materiais para minimizar a redução da capacidade de restauração e o aumento de peso na plataforma. As correntes de aço são frequentemente usadas nas extremidades das linhas de ancoragem devido à sua maior resistência às intempéries e à abrasão em comparação com outros materiais. Segundo Degenkamp e Dutta (1989a), as amarras comumente empregadas no ambiente *offshore* são do tipo *stud link*, com comprimento do elo igual a seis vezes o diâmetro nominal da corrente.

### 2.1.3.2 Conectores

Os conectores, ilustrados na Figura 3, são projetados para unir os componentes das linhas de ancoragem e conectar as extremidades das linhas às âncoras.

Figura 3 - Principais tipos de conectores utilizados para unir os componentes das linhas de ancoragem.



Fonte: Vryhof Anchors (2010).

### 2.1.3.3 Âncoras e Estacas

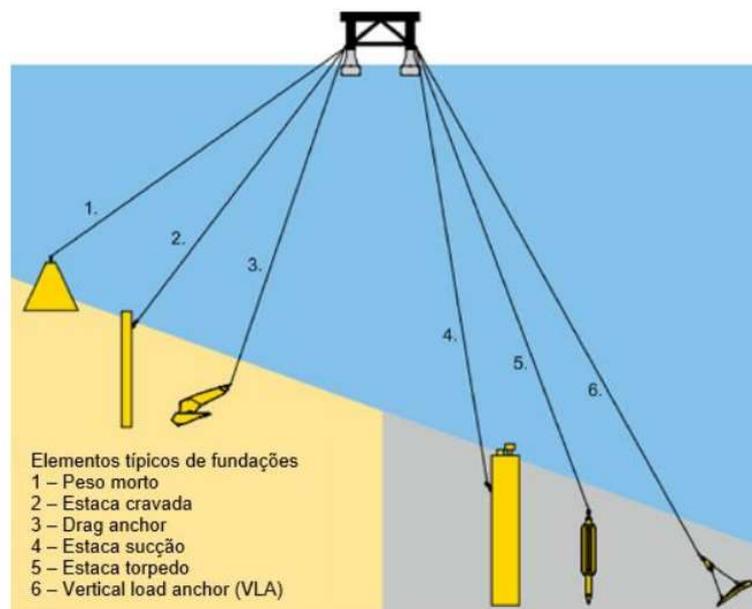
A ancoragem de plataformas flutuantes e de outros elementos apoiados ou enterrados no leito marinho é realizada por meio de elementos de fundação, como âncoras e estacas (Morais, 2013) projetados para suportar cargas estáticas, cíclicas e transitórias (API, 2006). Os principais tipos de elementos de fundação (Figura 4) são descritos a seguir:

- I. **Estacas de Sucção (*Suction Caisson Anchor*):** são estacas compostas por tubos cilíndricos de aço, ocos, com grande diâmetro, abertos na parte inferior e fechados no topo. A razão entre comprimento e diâmetro do tubo varia de 3 a 6, enquanto a razão entre diâmetro e espessura do tubo fica entre 100 e 250. Para cravá-las no solo marinho, são posicionadas acima do ponto desejado e, em seguida, cravadas pelo seu próprio peso. Após a cravação, são deslocadas para a profundidade de projeto por meio de dispositivos de sucção. Essas estacas geralmente são associadas à configuração do tipo *taut leg* devido à sua alta capacidade de resistir a cargas horizontais e verticais (Randolph *et al.*, 2005; API, 2006; Morais, 2013);
- II. **Âncoras de Arrasto (*Drag Embedment Anchors*):** são estacas compostas por três partes: *fluke*, *shank* e *shackle*, e são geralmente utilizadas na configuração do tipo convencional. Não são projetadas para resistir a elevados esforços verticais devido à sua configuração. A instalação é realizada pela aplicação de força de arrasto na linha de ancoragem (Randolph *et al.*, 2005; API RP 2A, 2006; Zhang, 2011; Morais, 2013);
- III. **Âncora de Carga Vertical (*Vertical Load Anchor - VLA ou Drag Embedment Plate Anchors*):** são âncoras projetadas para suportar tanto cargas horizontais quanto verticais, ao contrário das âncoras de arrasto, que suportam

predominantemente esforços verticais. São utilizadas na configuração do tipo *taut leg* (Randolph *et al.*, 2005);

- IV. **Âncoras de Placa (Suction Embedded Plate Anchor - SEPLA):** são âncoras em forma de placas projetadas para aumentar a capacidade de carga e facilitar a identificação exata de sua posição durante a cravação. Para a instalação, elas são colocadas na extremidade da estaca de sucção, crava-se o conjunto no solo marinho até a profundidade de projeto e, por fim, desconectam-se a âncora SEPLA da extremidade da estaca de sucção, permitindo a retirada da estaca (Randolph *et al.*, 2005);
- V. **Estacas Torpedo:** desenvolvidas pela Petrobras em 1995 para a fixação de *risers*, as estacas torpedo têm sido utilizadas desde 2001 na fixação de plataformas flutuantes e outros componentes em várias fases de exploração. Com um formato que se assemelha a um foguete com ponta cônica para facilitar a cravação, o diâmetro externo dessas estacas varia entre 0,75 m e 1,1 m, com comprimento entre 12 m e 15 m e peso entre 250 kN e 1000 kN. Dependendo do projeto, a estaca torpedo pode ou não ter aletas verticais. Um olhal fixado no topo da estaca auxilia na fixação de correntes de aço, permitindo a aplicação de carga em qualquer direção. Para a instalação, a estaca é posicionada a uma certa profundidade acima do leito marinho com o auxílio de um barco e, em seguida, é deixada cair pela ação da gravidade ((Medeiros Junior, 2002; Amaral *et al.*, 2002; Morais, 2013; Randolph *et al.*, 2005).

Figura 4 - Principais tipos de estacas e âncoras.

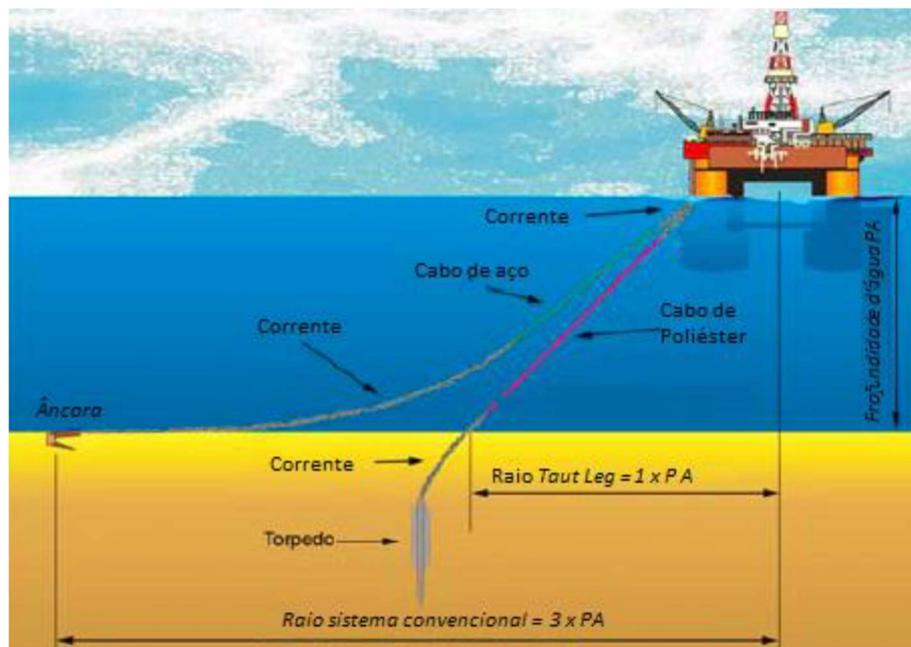


Fonte: Vryhof Anchors (2010).

### 2.1.4 Configurações de Linhas de Ancoragem

O comprimento total das linhas de ancoragem, que conectam as plataformas às âncoras no leito marinho, pode ser dividido em dois segmentos: o primeiro vai da plataforma até o leito marinho e o segundo do leito marinho até a âncora (Figura 5). Dependendo do tipo de plataforma e da profundidade da água, as linhas no primeiro segmento podem ter configurações como catenária, *taut leg* ou tendões verticais. No segundo segmento, as linhas de ancoragem adotam uma configuração de catenária invertida devido à resistência do solo ao deslocamento das linhas (Sampa, 2022).

Figura 5 - Configurações de linhas de ancoragem e elementos sistemas de ancoragem.



Fonte: Adaptado de SAGRILO *et al.*, (2010).

A configuração convencional, ou catenária, é definida por um raio geralmente de 2 a 3 vezes a profundidade da lâmina d'água, transmitindo esforços predominantemente horizontais para as âncoras. Contudo, em grandes profundidades, essa configuração se torna inviável devido à necessidade de correntes com comprimentos e diâmetros maiores (Randolph *et al.*, 2005; Castro, 2008; Vryhof Anchors, 2010; Morais, 2013).

A configuração *Taut leg* é caracterizada pelo tensionamento dos cabos que conectam a plataforma aos elementos de fundações, com raios de abrangência variando de 1 a 1,4 vezes a profundidade da lâmina d'água e um ângulo geralmente entre 30° e 45°. As âncoras usadas

nessa configuração precisam ser projetadas para resistir tanto a esforços horizontais quanto verticais (D'Souza et al., 1993; Castro, 2008; Vryhof Anchors, 2010; Morais, 2013).

A configuração de tendões verticais é comumente utilizada para ancorar plataformas do tipo TLP (*Tension Leg Platform*), boias e monoboias em águas profundas. Nesse arranjo, as linhas de ancoragem formam ângulos próximos de 90° com a horizontal. As linhas, compostas por cabos de poliéster ou tubos de aço, atuam como tirantes, transmitindo os esforços verticais de tração aos elementos de fundação (Morais, 2013).

No segundo trecho, enterrado no solo marinho, a linha assume uma forma de catenária invertida devido à resistência do solo ao deslocamento da corrente. Determinar com precisão a configuração dessa catenária invertida é desafiador, pois ela não pode ser observada diretamente dentro do solo. No entanto, sabe-se que sua configuração final depende da história de tensões aplicadas na linha durante os períodos de pré-carregamento e serviço, da profundidade de embutimento, da geometria da corrente e da resistência do solo (Gault e Cox, 1974; Vivatrat *et al.*, 1982; Degemkamp e Dutta, 1989a; Neubecker e Randolph, 1995a, 1995b; Vryhof Anchors, 2010; Zhang, 2011). Compreender melhor o comportamento desse trecho, especialmente quanto à interação solo-corrente, é o que motiva o desenvolvimento do aparato experimental deste estudo.

### **2.1.5 Cargas Ambientais**

Os esforços nos sistemas de ancoragem são gerados por diversas ações ambientais, como ondas, vento, correntes, terremotos e outros eventos naturais, sendo que as mais significativas provêm do vento, das ondas e das correntes (Figura 6). Além disso, impactos de operações específicas também podem induzir esforços nos sistemas de ancoragem (API, 2006; Vryhof Anchors, 2010).

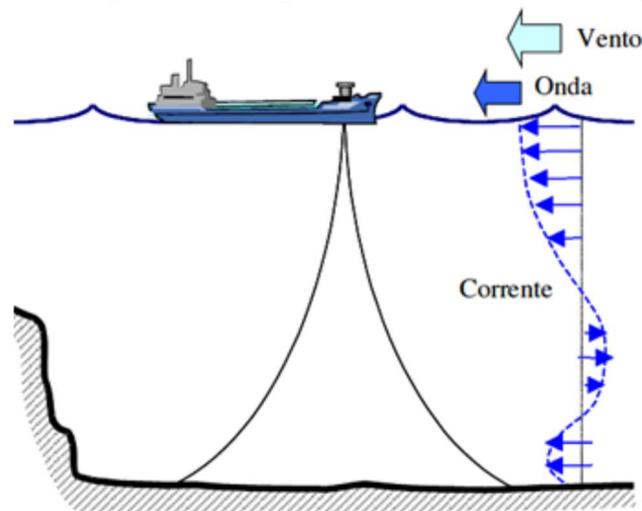
## **2.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO LONGITUDINAL DE CORRENTES**

Para estudar a interação entre corrente e solo, diversos estudos experimentais foram realizados em solos arenosos e argilosos, utilizando diferentes aparatos experimentais. Neste item, são discutidos alguns desses trabalhos com o objetivo de fornecer uma base para a concepção e montagem de um aparato experimental para ensaios de arrancamento.

Conforme destacado por Neubecker e Randolph (1995a) e Liu *et al.* (2013), compreender o mecanismo de interação entre o solo marinho e o trecho enterrado da linha de ancoragem em fundações *offshore* é crucial por dois motivos principais. Primeiro, isso permite a previsão da trajetória das âncoras de arrasto e a estimativa da profundidade de embutimento e da carga aplicada nas âncoras. Segundo, é essencial para prever a configuração da catenária invertida, que afeta diretamente o modo de falha e a carga aplicada em âncoras do tipo sucção e torpedo, além de influenciar o desempenho das âncoras de arrasto.

Os estudos sobre a interação solo-corrente podem ser divididos em dois grupos. O primeiro analisa a razão de eficiência (coeficiente de arrasto) de correntes livres em contato com a superfície do solo, representando o trecho horizontal da linha de ancoragem no leito marinho. O segundo grupo foca na interação entre o solo e as correntes completamente enterradas, abordando a configuração da catenária e a atenuação de carga (Vivatrat *et al.*, 1982). Os trabalhos apresentados a seguir pertencem ao segundo grupo.

Figura 6 - Cargas atuantes na plataforma e nas linhas de ancoragem.



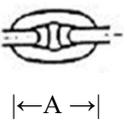
Fonte: Hernández (2004).

### 2.2.1 Yen e Tofani (1984)

Yen e Tofani (1984) realizaram ensaios laboratoriais de arrancamento para avaliar a resistência de solos argilosos mobilizada pelo deslocamento de correntes do tipo *stud link*. As correntes utilizadas tinham diâmetros nominais de 2" e 3/4". Correntes não soldadas, com 2, 4 e 6 elos, foram enterradas vertical e horizontalmente em diferentes profundidades e depois deslocadas longitudinalmente para analisar a resistência por atrito lateral. Já as correntes

soldadas, com 2, 4 e 6 elos, foram enterradas horizontalmente e deslocadas transversalmente para avaliar a resistência normal. Em todos os ensaios, as correntes foram deslocadas a uma velocidade de 1,5" por minuto até a mobilização da resistência máxima. A Tabela 1 apresenta as dimensões das correntes, e a Figura 7 ilustra as disposições das correntes no tanque experimental.

Tabela 1 – características de correntes com diâmetros nominais de 2" e 3/4".

Tipo	Diâmetro	Peso do elo (lbs)		 B	$A_s$ (ft <sup>2</sup> )	$A_c$ (ft <sup>2</sup> )	$A_p$ (ft <sup>2</sup> )
3/4 pol.	3/4	1,4	4,5"	2,5"	0,13	0,07	0,01
2 pol.	4,8	4,8	12"	7,2"	0,9	0,53	0,07

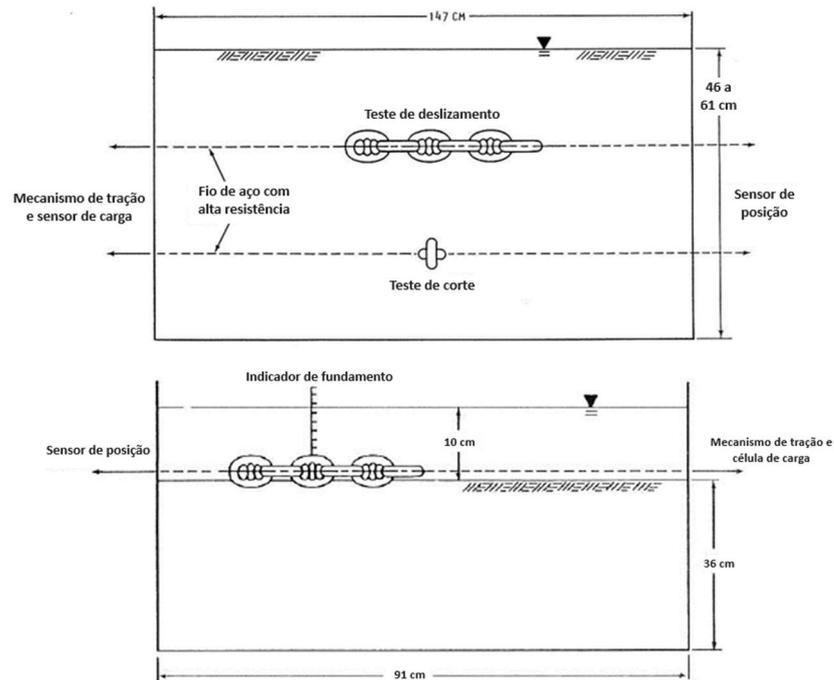
<sup>a</sup> Área efetiva de cisalhamento por elo =  $32.5 D^2$

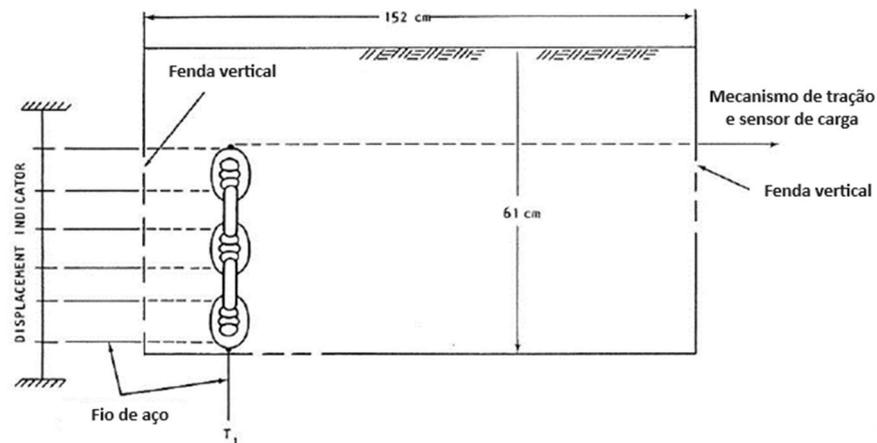
<sup>b</sup> Área efetiva de corte =  $18.96 D^2$

<sup>c</sup> Área frontal projetada por elo =  $(B - D) \times D$

Fonte: Yen e Tofani (1984).

Figura 7 - Esquema do aparato experimental.



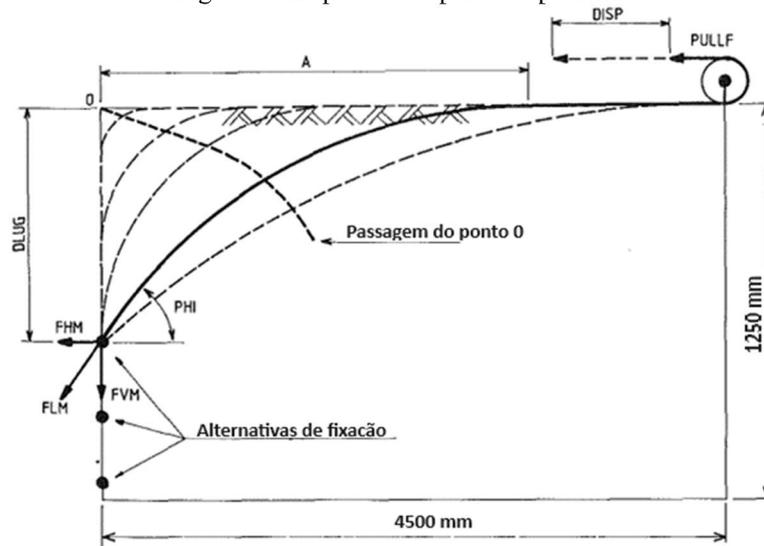


Fonte: Yen e Tofani (1984).

### 2.2.2 Degenkamp e Dutta (1989)

Degenkamp e Dutta (1989) foram pioneiros na realização de ensaios laboratoriais para investigar o mecanismo de interação solo-corrente e a configuração da catenária invertida. Eles conduziram 10 ensaios em argilas moles, variando os tamanhos das correntes (6,4 mm, 9,5 mm e 16 mm) e as profundidades dos olhais. A Figura 8 apresenta o esquema do arranjo experimental. As correntes foram fixadas a um olhal na lateral de um tanque vazio (4,5 m de comprimento, 1,25 m de largura e 0,37 m de altura), permitindo a medição das forças horizontais e verticais. A força de tração foi medida em um dispositivo específico, com a corrente sendo puxada a uma velocidade de 0,002 m/s, adequada para gerar condições de carregamento não drenado em solo argiloso. Durante o experimento, foram medidos, em intervalos regulares, o deslocamento (DISP), o comprimento projetado da corrente embutida, a força de tração horizontal (PULLF) e as forças horizontais e verticais no olhal (FHM e FVM).

Figura 8 - Esquema do aparato experimental.

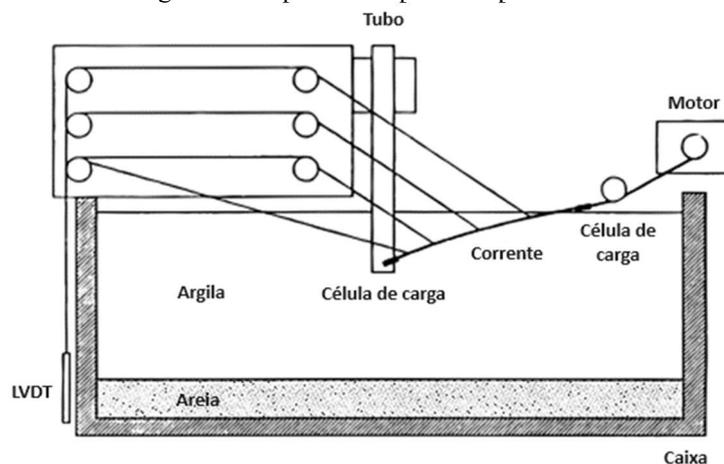


Fonte: Degenkamp e Dutta (1989).

### 2.2.3 Bang *et al.* (1996)

O estudo de Bang *et al.* (1996) teve como objetivo principal realizar ensaios em centrífuga para investigar o mecanismo de transferência de carga de linhas de ancoragem enterradas em argila branca (caulim Speswhite) a profundidades de 5 cm, 10 cm e 15 cm. Os ensaios foram conduzidos sob uma aceleração centrífuga de 80 vezes a aceleração gravitacional. A corrente em miniatura, com diâmetro nominal de 0,48 cm, foi carregada horizontalmente com 208,5 N na superfície do solo. A Figura 9 apresenta o aparato experimental utilizado.

Figura 9 - Esquema do aparato experimental.

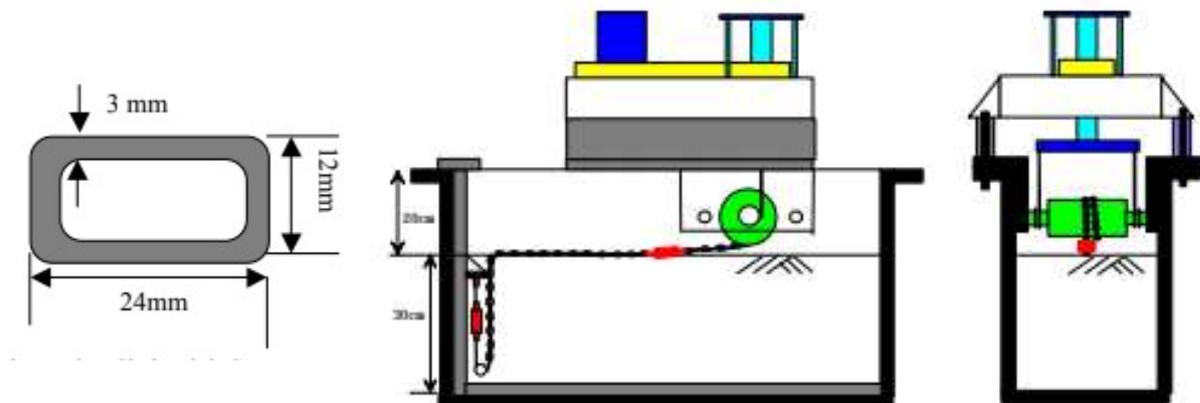


Fonte: Bang *et al.* (1996).

### 2.2.4 Bang *et al.* (2003)

O estudo de Bang *et al.* (2003) realizou ensaios em centrífuga com modelos de linhas de ancoragem enterradas em solo arenoso, com o objetivo de calibrar a solução analítica para âncoras de arrasto. As linhas de ancoragem, compostas por correntes e cabos de aço, foram posicionadas em profundidades de 15 cm e 20 cm no solo e submetidas a três níveis de tensão (baixa, média e alta) sob alta aceleração na centrífuga, simulando as condições reais de campo. As correntes tinham elos com largura de 12 mm, comprimento de 24 mm e espessura de 3 mm, com um peso de 1,476 N/m. Os cabos de aço tinham diâmetro de 3 mm e peso de 0,337 N/m. A resistência última das correntes e cabos era de 5.197 N e 4.805 N, respectivamente. A Figura 10 mostra a geometria de um elo de corrente e o aparato experimental utilizado.

Figura 10 - Geometria de um elo de corrente e o esquema do aparato experimental.



Fonte: Bang *et al.* (2003).

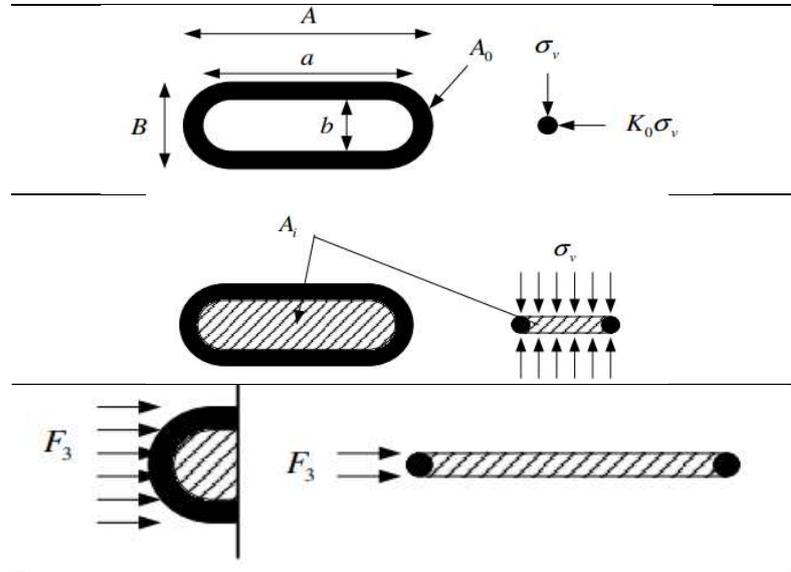
### 2.2.5 Kwon (2010)

Kwon (2010) conduziu ensaios experimentais para investigar o mecanismo de resistência ao arrancamento de correntes enterradas em areia, focando no atrito lateral solo-corrente, na resistência solo-solo e na resistência passiva da corrente (Figura 11).

Os ensaios foram conduzidos em uma caixa de aço com 127 cm de comprimento, 80 cm de largura e 80 cm de altura. Um airbag no topo da caixa aplicou uma força vertical constante por meio de pressão de ar, aumentando a tensão no solo compactado a 95% do Grau de Compactação. Correntes de 80 cm foram usadas, e quatro transdutores de deslocamento (dois na frente e dois atrás) mediram o deslocamento. A Figura 12 mostra as três configurações de

elementos (correntes abertas, correntes fechadas e chapas) para estudo do mecanismo de interação, enquanto a Figura 13 apresenta o esquema do equipamento utilizado nos ensaios.

Figura 11 – Parcelas de resistências mobilizadas durante o arrancamento de correntes.



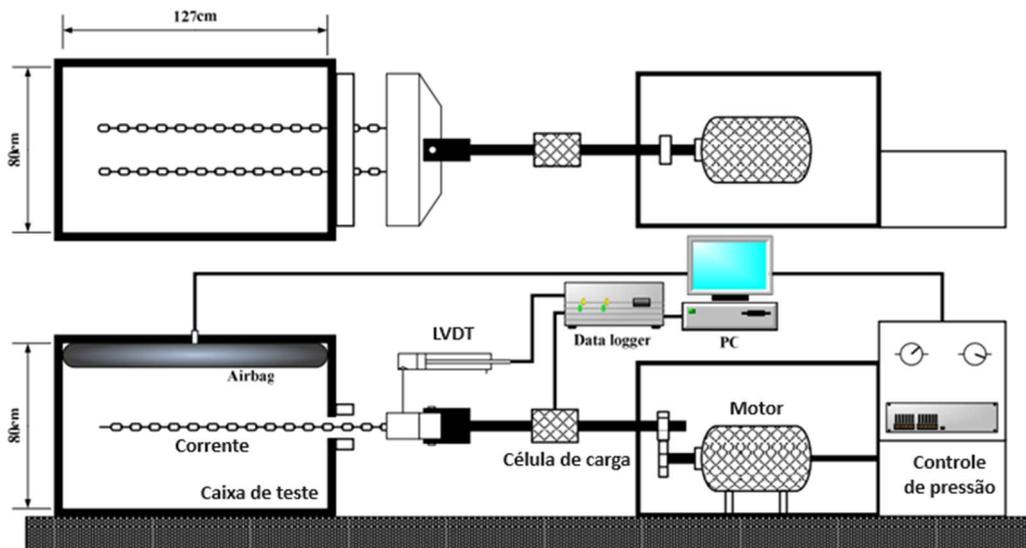
Fonte: Kwon (2010).

Figura 12 - Forma de elementos de ligação.



Fonte: Kwon (2010).

Figura 13 - Esquema do aparato de ensaios.

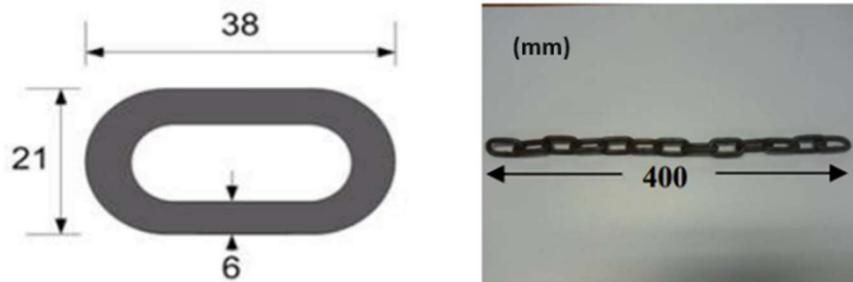


Fonte: Kwon (2010).

### 2.2.6 Choi, Kim, Kwon e Youn (2014)

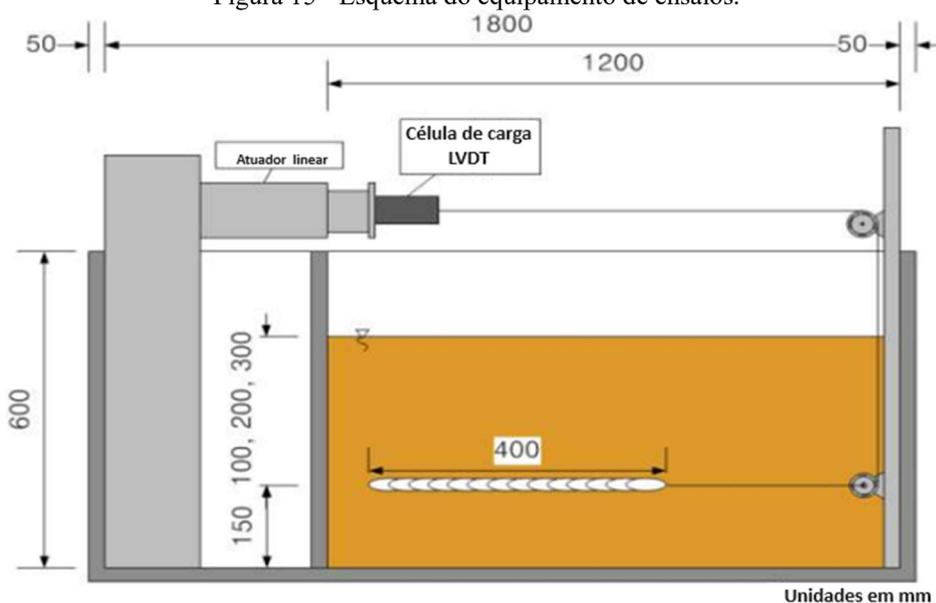
Choi *et al.* (2014) realizaram ensaios laboratoriais para avaliar a capacidade de arrancamento de correntes de aço enterradas em areias saturadas. Utilizaram correntes de aço com 13 elos idênticos, cada um com 38 mm de comprimento, 21 mm de largura e diâmetro nominal de 6 mm, totalizando um comprimento de 400 mm (Figura 14). O dispositivo experimental, apresentado na Figura 15, incluía um atuador, um LVDT (Transformador Linear de Deslocamento Variável), uma célula de carga e uma polia. A célula de carga tem capacidade de 2 kN e precisão de 0,5 N, enquanto os LVDTs possuem precisão de 0,005 mm. Foram realizados nove testes em três profundidades de embutimento diferentes (100 mm, 200 mm e 300 mm), com três testes por profundidade.

Figura 14 – Representação de um elo de corrente e a imagem da corrente utilizada.



Fonte: Choi (2014).

Figura 15 - Esquema do equipamento de ensaios.

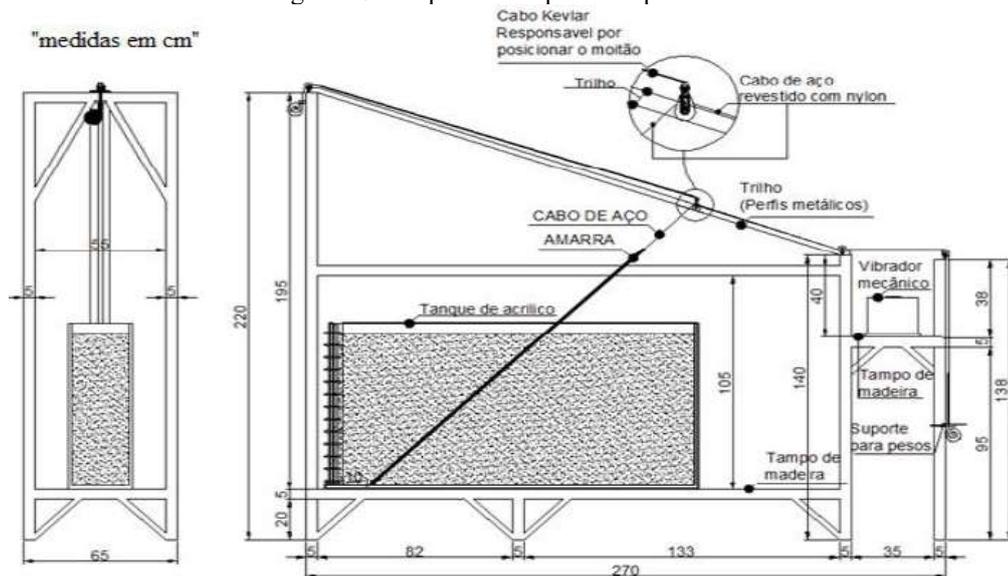


Fonte: Choi (2014).

### 2.2.7 Rocha (2014) e Sampa (2015)

Com o objetivo de investigar o comportamento da linha de ancoragem embutida no solo e a atenuação de cargas ao longo desse trecho, Rocha (2014) e Sampa (2015) conduziram uma série de ensaios em solos argilosos, utilizando o aparato experimental projetado por Rocha (2014), ilustrado na Figura 16. Durante os ensaios, as cargas na extremidade final da corrente foram medidas por uma célula de carga fixada no fundo de uma caixa de acrílico. Os ensaios foram realizados com três espessuras diferentes (72 cm, 48 cm e 24 cm) de solo, correntes com 3 mm de diâmetro nominal e envolveram ciclos de carga e descarga com incrementos de 1 kgf (9,81 N), até atingir 14 kgf (137,34 N), em 12 ângulos de incidência da corrente ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  e  $55^\circ$ ) em relação ao eixo vertical. A principal diferença entre os ensaios de Rocha (2014) e Sampa (2015) foi o tipo de carregamento aplicado: Rocha (2014) utilizou carregamentos estáticos, enquanto Sampa (2015) empregou carregamentos dinâmicos.

Figura 16 - Esquema do aparato experimental.



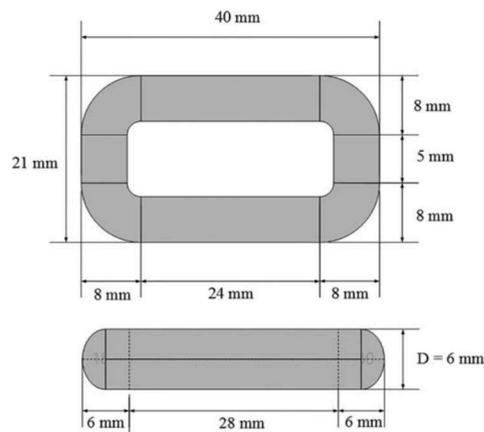
Fonte: Sampa (2015).

### 2.2.8 Kim (2017)

Kim (2017) conduziu ensaios laboratoriais em correntes de ancoragem, variando a profundidade de embutimento e o número de elos de correntes, entre 1 e 18 elos. Foram utilizadas correntes com diâmetro nominal de 6 mm, comprimento e largura do elo de 40 mm e 21 mm respectivamente (Figura 17). A resistência ao arrancamento medida foi subdividida em

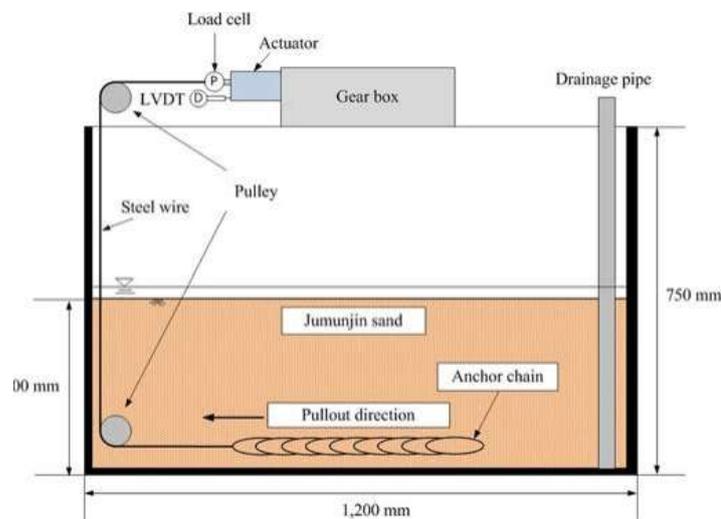
resistência por atrito e resistência passiva. O dispositivo experimental, conforme ilustrado na Figura 18, incluía um recipiente de acrílico para o condicionamento do solo, sistema de controle de deslocamento, célula de carga, LVDTs, tubo de drenagem, polias e sistema de aquisição de dados. As correntes foram arrancadas a uma velocidade de 1,0 mm/min para manter a areia drenada.

Figura 17 – Representação do elo da corrente utilizado.



Fonte: Kim (2017).

Figura 18 - Esquema do aparato de arrancamento.



Fonte: Kim (2017).

### 2.2.9 Sampa (2019)

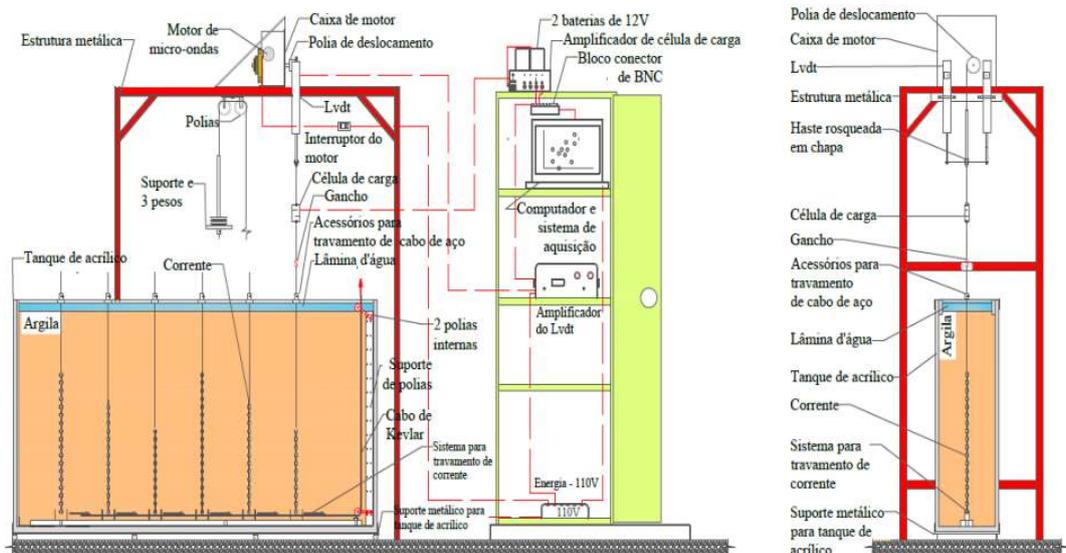
Sampa (2019) desenvolveu um aparato experimental para realizar ensaios de arrancamento, com o objetivo de investigar a interação entre correntes e argilas moles. O aparato consistia em um tanque de acrílico para armazenar as amostras de solo, LVDTs para

medir o deslocamento das correntes, uma célula de carga para medir as forças geradas, e um sistema motor com polia para puxar as correntes enterradas. O tanque de acrílico, projetado por Rocha (2014), tinha dimensões internas de 152 cm de comprimento, 24 cm de largura e 80 cm de altura, com paredes de 1,5 cm de espessura. A célula de carga utilizada tinha capacidade de 490,5 N, e os LVDTs tinham um curso máximo de 100 mm.

Nos ensaios, foram empregadas correntes de aço soldadas e não soldadas, além de tubos metálicos e barras chatas de aço de diferentes tamanhos. Mais detalhes sobre o sistema de aquisição de dados, as dimensões dos materiais enterrados, as propriedades da argila e as características dos ensaios podem ser encontrados no trabalho.

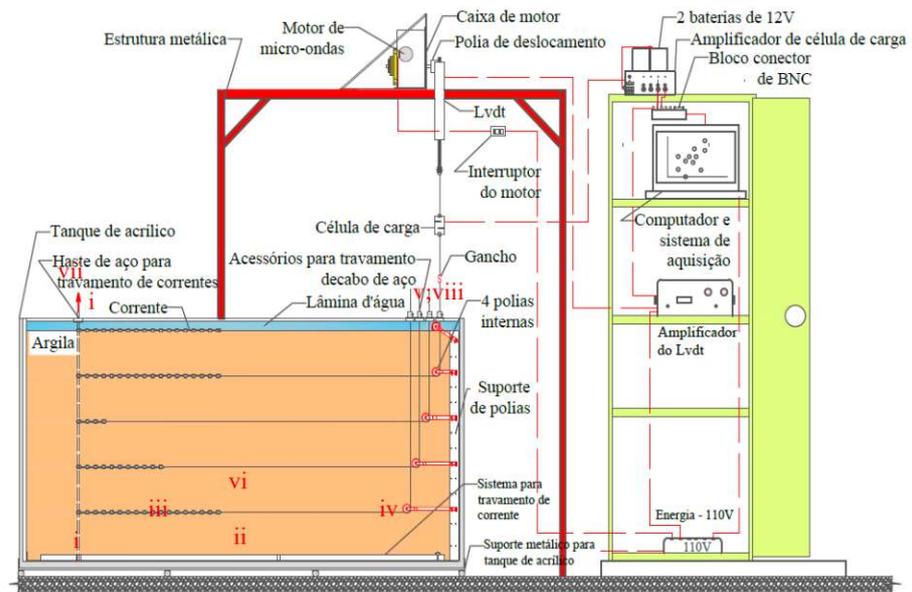
As Figura 19, 20 e 21 apresentam os três esquemas de layout experimental utilizados por Sampa (2019) para realizar os ensaios de arrancamento com correntes enterradas verticalmente e horizontalmente, sendo submetidos ao deslocamento nas direções longitudinal e transversal.

Figura 19 - Aparato experimental para correntes verticais deslocados longitudinalmente.



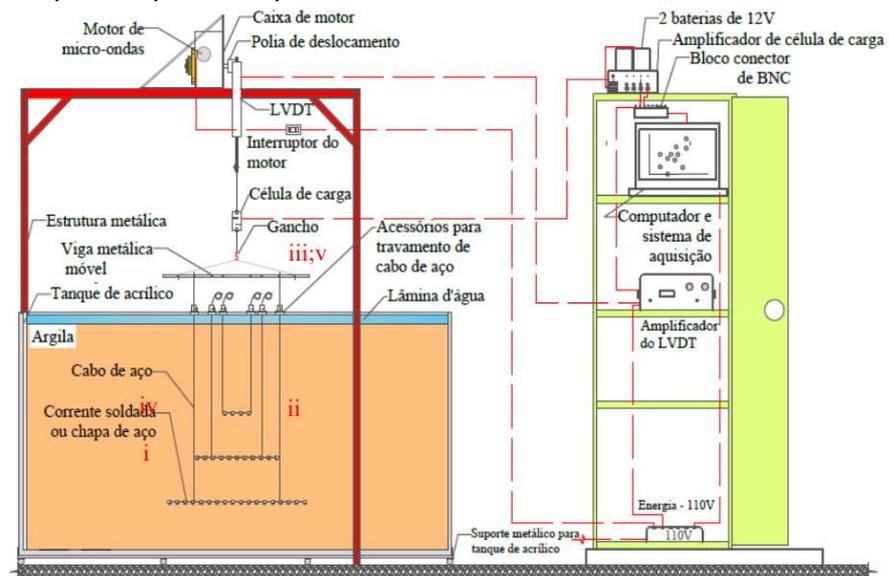
Fonte: Sampa (2019).

Figura 20 - Aparato experimental para correntes horizontais deslocados longitudinalmente.



Fonte: Sampa (2019).

Figura 21 - Aparato experimental para correntes horizontais deslocados transversalmente.



Fonte: Sampa (2019).

Além dos estudos mencionados acima, House (2002), Rui (2021) e outros autores realizaram ensaios no laboratório para estudar mecanismos de interação solo-corrente.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o projeto do aparato experimental para o ensaio de arrancamento de correntes utilizados como linhas de ancoragem, detalhando os equipamentos e materiais utilizados. Também são apresentados os procedimentos adotados para a montagem do equipamento no laboratório.

#### 3.1 CONCEPÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental para ensaios de arrancamento de correntes foi concebido com o objetivo de introduzir estudos sobre os mecanismos de interação corrente-solo na Universidade Federal de Santa Catarina, especificamente no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS). A concepção do aparato baseou-se nos estudos anteriores discutidos no Capítulo 2, com ênfase nos trabalhos de Rocha (2014) e Sampa (2015 e 2019).

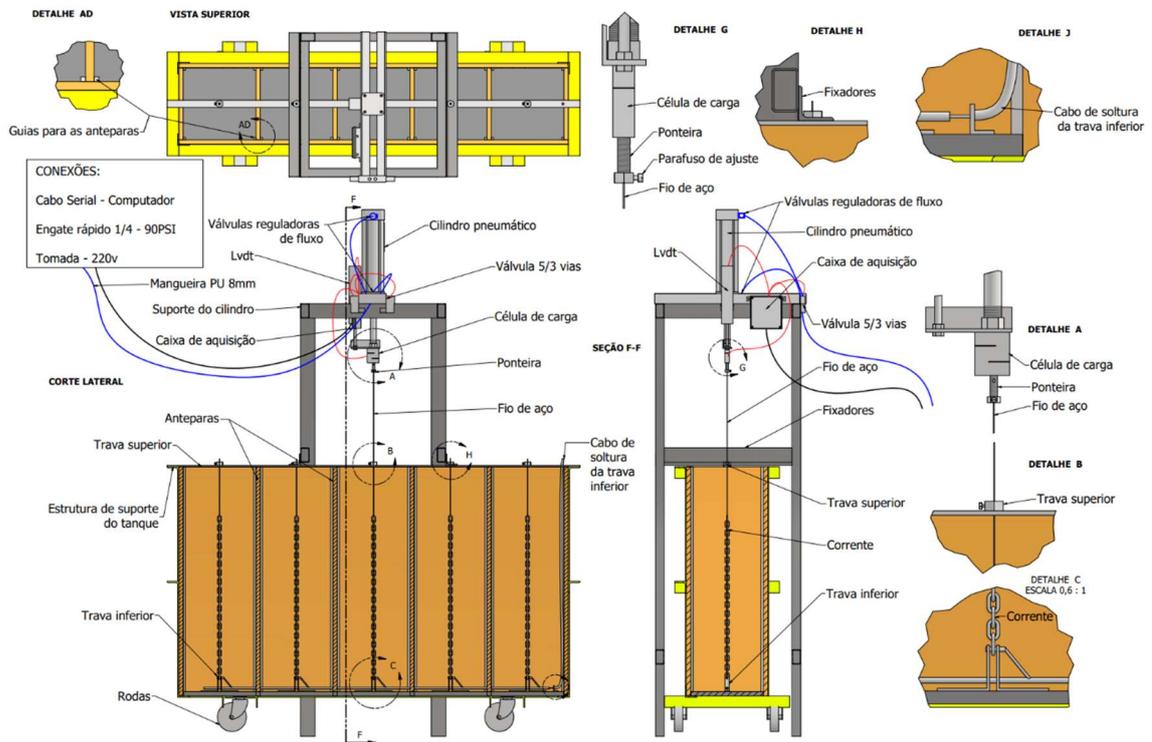
A Figura 22 apresenta uma visão geral do projeto do aparato experimental, enquanto a Figura 23 ilustra o esquema 3D do mesmo. Nos próximos itens, são detalhadas as partes constituintes do aparato experimental, incluindo correntes de aço, solo arenoso, sistemas de acondicionamento de solo, de travamento e de arrancamento de correntes, além do sistema de medição, aquisição de dados e acessórios.

##### 3.1.1 Sistema para acondicionamento do solo

O sistema para acondicionamento do solo foi projetado para armazenar adequadamente as amostras de solo e garantir que elas sejam compactadas ou lançadas em condições homogêneas e controladas, essenciais para a qualidade dos resultados. Este sistema, que inclui um tanque de madeira e um suporte metálico, foi desenvolvido com base nos estudos de Rocha (2014) e Sampa (2015 e 2019), com adaptações específicas para o contexto e as necessidades do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS).

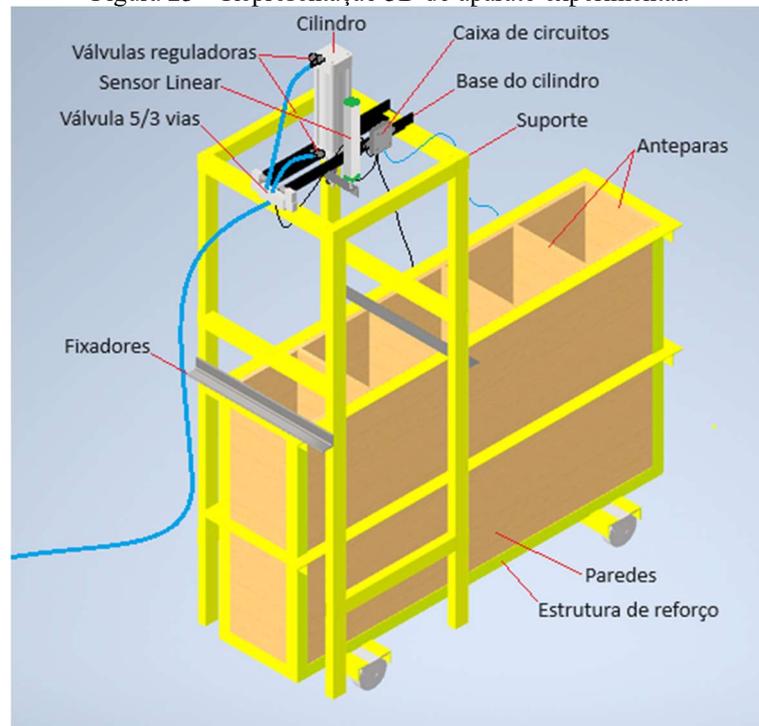
O tanque de madeira, ilustrado na Figura 26, foi dimensionado para acomodar tanto solos arenosos quanto argilosos, independentemente do método de preparação da amostra e do preenchimento do tanque. Ele é composto por duas paredes laterais, um fundo e seis anteparas, todos fabricados em madeira laminada (em compensado naval com espessura de 15mm). O material utilizado para o tanque possui alta resistência mecânica e à água, além de apresentar

Figura 22 - Aparato desenvolvido para ensaio de arrancamento de correntes.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 23 – Representação 3D do aparato experimental.

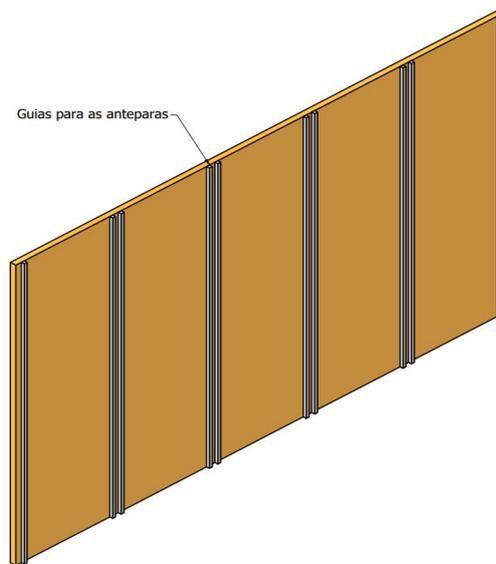


Fonte: Autoria própria (2024).

um custo relativamente baixo em comparação com alternativas como acrílico e outros plásticos. Para prevenir a proliferação de mofo e aumentar ainda mais a resistência à umidade, a madeira do tanque foi tratada com várias camadas de pintura protetora.

As paredes laterais e as anteparas do tanque foram projetadas para possibilitar a realização de ensaios de arrancamento com correntes tanto horizontais quanto verticais. O tanque permite a execução de cinco ensaios verticais, um em cada compartimento, com as anteparas internas removíveis para ensaios com correntes horizontais. Para a montagem e desmontagem das anteparas nas posições corretas, foram projetadas guias fabricadas com perfis quadrados de alumínio 8 mm x 8 mm, parafusadas nas duas laterais do tanque nas posições definidas para as anteparas. Estas evitam qualquer deslocamento das anteparas, exceto para montagem e desmontagem pela parte superior (Figura 24).

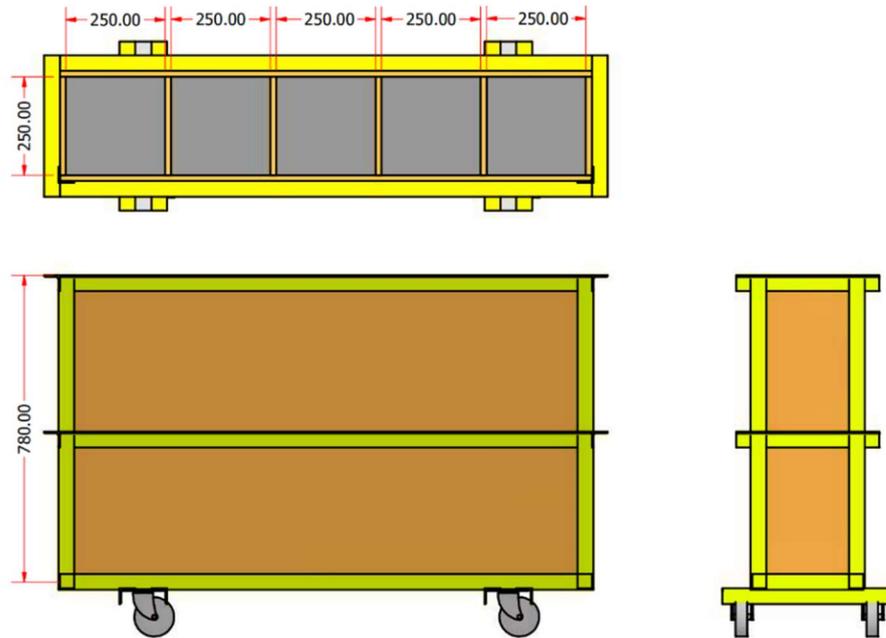
Figura 24 - Guias para as anteparas montadas nas laterais do tanque.



Fonte: Autoria própria (2024).

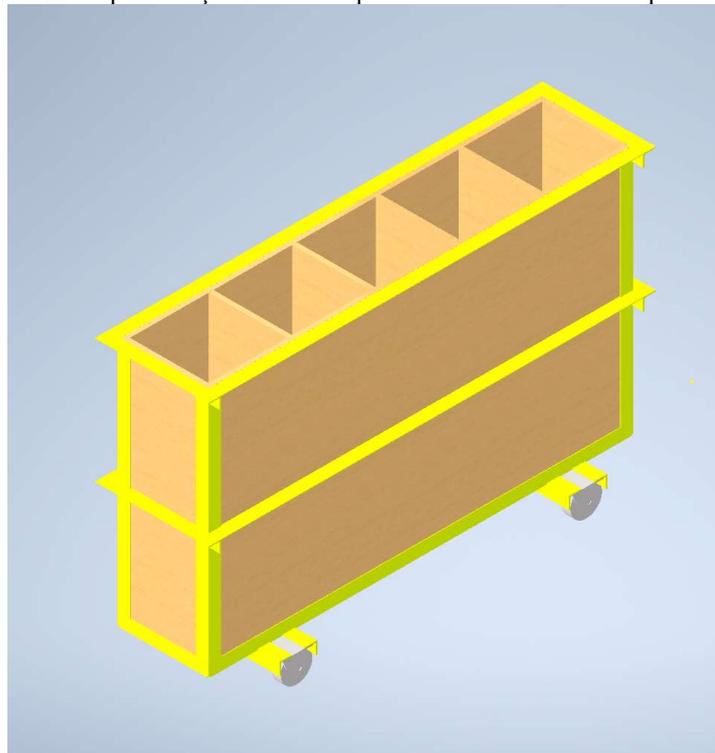
As dimensões internas do tanque são de 25 cm de largura, 131 cm de comprimento e 78 cm de altura. Os compartimentos, separados pelas anteparas internas, possuem seção quadrada com 25 cm de lado (Figura 25). Essas dimensões foram adotadas para garantir que os resultados dos ensaios de arrancamento não sejam influenciados pelas paredes do tanque (contornos). A Figura 26 ilustra a representação esquemática em 3D do tanque com os 5 compartimentos.

Figura 25 - Esquema do tanque montado com as anteparas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 26 – Representação 3D do tanque de madeira com os compartimentos.

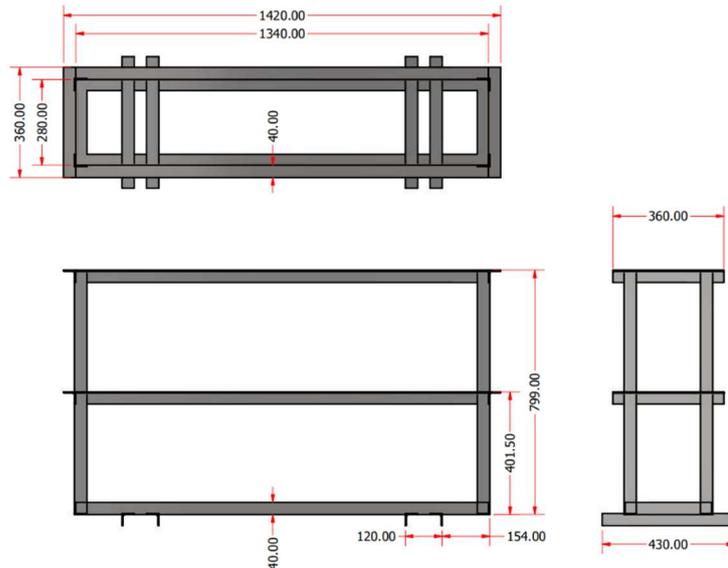


Fonte: Autoria própria (2024).

A estrutura de suporte, confeccionada em barras metálicas tipo cantoneira (40 mm x 40 mm x 3 mm), foi projetada para proporcionar a rigidez necessária ao tanque, suportando a carga do solo e facilitando a desmontagem sem danificar as placas de madeira das paredes.

Além disso, foram adicionadas quatro rodas maciças (capacidade de 600 kg) à estrutura, o que facilita o manejo e o posicionamento do tanque dentro do laboratório. O projeto e a representação 3D da estrutura de suporte são ilustrados nas Figura 27 e Figura 28, respectivamente.

Figura 27 - Projeto da estrutura de suporte (Medidas em mm).



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 28 – Representação em 3D da estrutura de suporte.



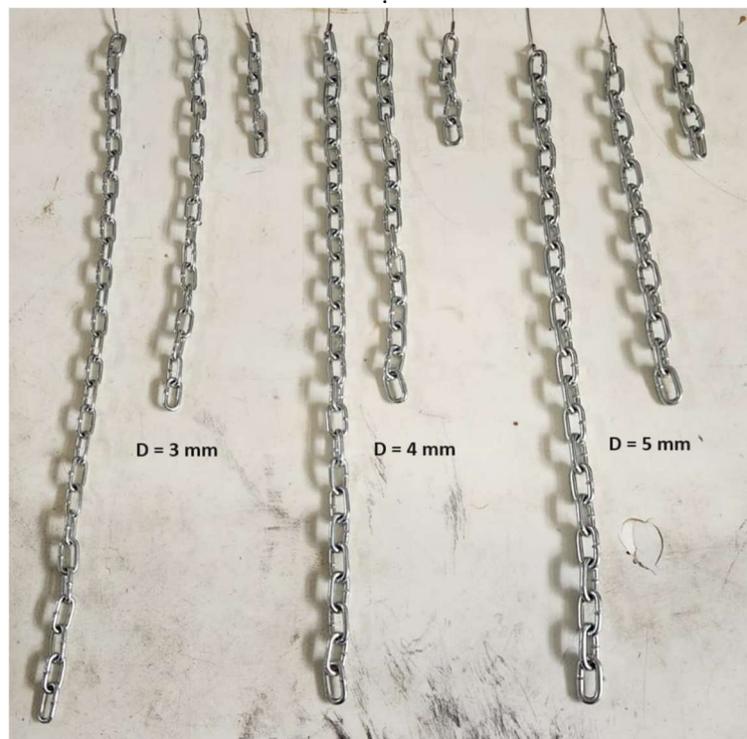
Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.2 Correntes de aço

Foram adotadas correntes de aço com diâmetros nominais de 3 mm, 4 mm e 5 mm, seguindo as referências dos trabalhos de Rocha (2014) e Sampa (2015 e 2019). O diâmetro comercial de 3 mm foi escolhido como referência, correspondendo, em escala 1:40, ao diâmetro nominal de 120 mm das correntes utilizadas no campo pela Petrobras. Para cada diâmetro de corrente, foram selecionados comprimentos base de 10 cm, 30 cm e 50 cm, considerando as dimensões do tanque de madeira.

A escolha de correntes com diferentes tamanhos tem como objetivo analisar a influência da dimensão das correntes no comportamento do mecanismo de interação. A Figura 29 apresenta imagens das correntes de aço utilizadas nos ensaios. Um resumo das dimensões das correntes utilizadas pode ser visualizado na Tabela 1, de acordo com os elementos presentes na Figura 30.

Figura 29 – Correntes de aço com diâmetro nominal de 3 mm , 4 mm e 5 mm e comprimentos de 10 cm, 30 cm e 50 cm.



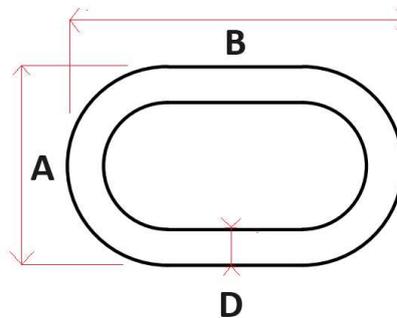
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 1 - Resumo das medidas das correntes utilizadas.

Corrente	Diâmetro comercial, $D_c$ (mm)	Diâmetro nominal, $D$ (mm)	Comprimento base, $L_b$ (cm)	Comprimento, $L$ (cm)	A (mm)	B (mm)	Número de elos
1	3	3,30	10	11,4	12,30	24,45	6
2	3	3,30	30	31,4	12,30	24,45	17
3	3	3,30	50	51,1	12,30	24,45	27
4	4	4,03	10	10,3	15,06	27,28	5
5	4	4,03	30	31,7	15,06	27,28	16
6	4	4,03	50	50,8	15,06	27,28	26
7	5	4,61	10	11,6	16,5	30,8	5
8	5	4,61	30	31,0	16,5	30,8	14
9	5	4,61	50	50,2	16,5	30,8	23

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 - Elementos de medida dos elos.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.3 Sistema de travamento de correntes

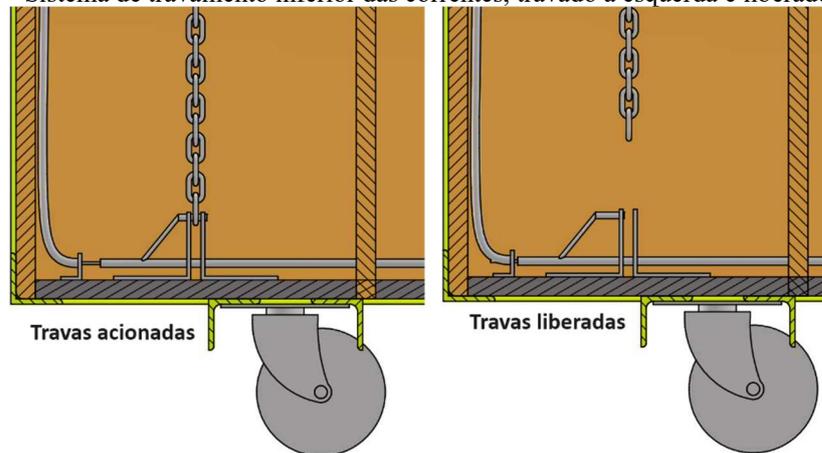
No fundo do tanque, foram instaladas guias metálicas para assegurar o tracionamento e a manutenção das correntes verticais na posição correta durante a preparação dos ensaios. As guias são localizadas em pares espelhados no centro da chapa inferior de cada compartimento, perfuradas para a passagem de pinos metálicos e compostas por peças metálicas em forma de L. Essas peças estão distantes cerca de 6 mm uma da outra e alinhadas, permitindo que uma barra que se estende por todo o comprimento do tanque atravesse todas as peças.

Travas finas foram soldadas na barra para atravessar as peças em L do guia por um orifício localizado próximo ao topo, prendendo o elo inferior da corrente. O acionamento de um cabo de aço conectado à extremidade da barra libera as extremidades das correntes, permitindo posterior deslocamento das mesmas, conforme mostra a Figura 31.

Na parte superior do tanque, foi instalada uma barra metálica de perfil quadrado, com aproximadamente 15 mm de largura, 3 mm de espessura e comprimento igual ao do tanque.

Nesta barra, foram soldadas porcas perfuradas lateralmente, nas quais foram confeccionadas roscas para a montagem de parafusos laterais de ajuste (Figura 29).

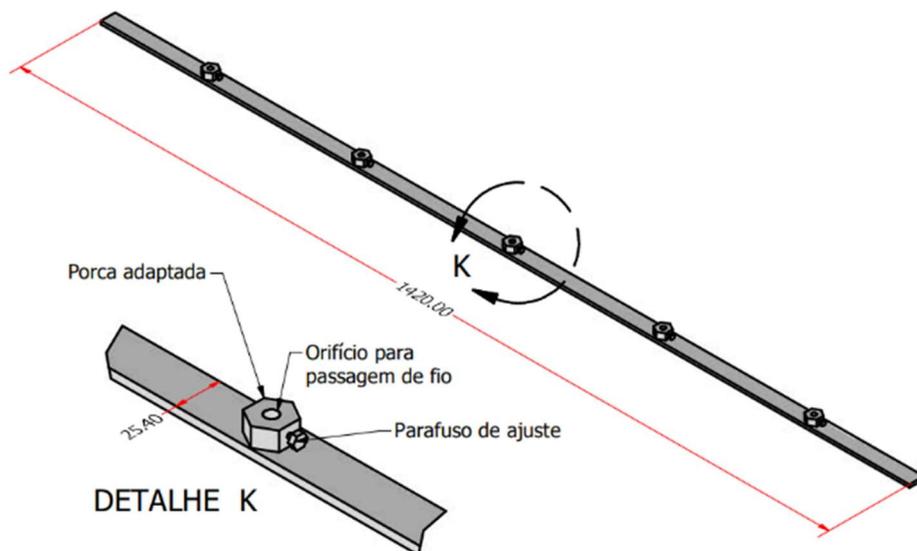
Figura 31 - Sistema de travamento inferior das correntes, travado a esquerda e liberado a direita.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os cabos de aço, presos aos primeiros elos das correntes, atravessam essas porcas e depois são tracionados. Ao apertar os parafusos laterais, os cabos de aço tracionados são fixados, mantendo as correntes tracionadas. O solo é colocado nos compartimentos somente após o tracionamento das correntes verticais. A Figura 32 ilustra a trava superior das correntes e as porcas soldadas na chapa para o travamento superior.

Figura 32 - Trava superior.



Fonte: Autoria própria (2024).

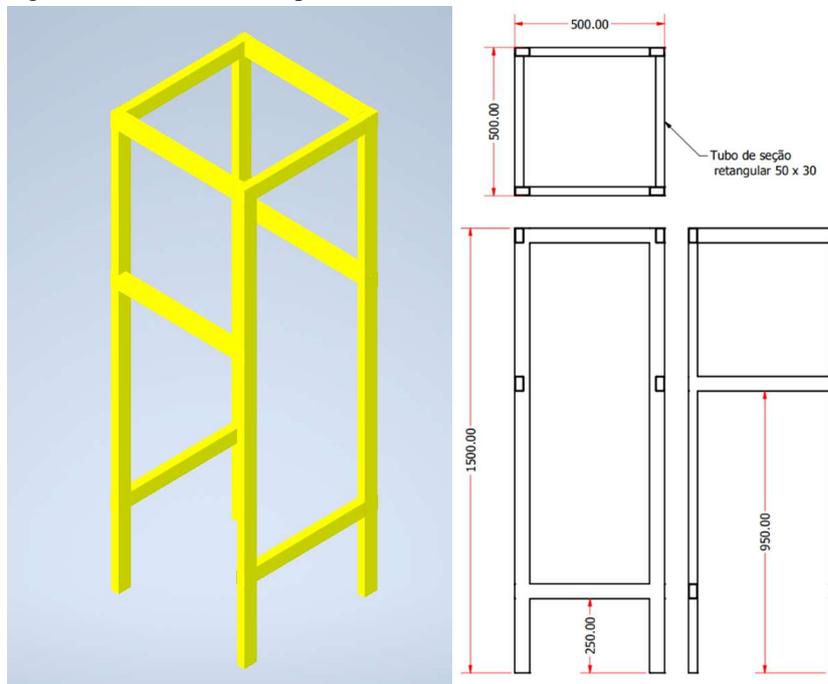
### 3.1.4 Sistema de arrancamento

O sistema de arrancamento desenvolvido para o experimento foi projetado para ser de baixo custo, com alta precisão e grande resistência. Ele é responsável pelo deslocamento das correntes a uma velocidade controlada, variando entre 5 mm/min e 15 mm/s.

#### 3.1.4.1 Estrutura de suporte de arrancamento

A estrutura de suporte de arrancamento, construída com tubos metálicos de seção retangular de 50 mm x 30 mm, é responsável por suportar e estabilizar o sistema de arrancamento (Figura 33). Suas dimensões, com 60 cm de largura, 50 cm de comprimento e 150 cm de altura, foram determinadas para se ajustar às dimensões do tanque, permitindo a movimentação do tanque em uma direção para a realização de múltiplos ensaios. Nos quatro pés da estrutura de suporte, foram instaladas regulagens de altura para nivelar o equipamento e garantir a verticalização do cilindro.

Figura 33 – Estrutura de suporte do sistema de arrancamento (Medidas em mm).

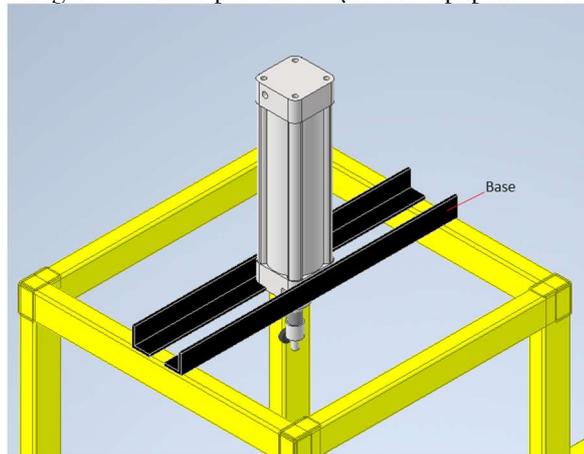


Fonte: Autoria própria (2024).

No topo da estrutura de suporte foi fixada a base do cilindro, confeccionada com duas barras tipo cantoneira de 50 mm x 50 mm x 500 mm. As barras possuem quatro furos para a

fixação do cilindro pneumático, além de suportes para o transdutor de deslocamento linear, a válvula de controle e a caixa de aquisição (Figura 34).

Figura 34 - Base para instalação dos equipamentos



Fonte: Autoria própria (2024).

#### 3.1.4.2 Cilindro pneumático

Um cilindro pneumático normalizado (Figura 35), com diâmetro de 63 mm e curso de 200 mm, foi utilizado devido a sua grande capacidade de carga, estimada em torno de 170 kg na retração quando opera a uma pressão de 90 psi. Outras vantagens do sistema pneumático incluem o baixo custo de aquisição, a facilidade de operação e a baixa manutenção.

Figura 35 - Cilindro pneumático normalizado.



fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.4.3 Válvula de controle

Uma válvula de controle pneumática do tipo 5/3 vias (Figura 36) foi utilizada para controlar a movimentação do cilindro. A função dessa válvula é permitir, orientar ou interromper o fluxo de ar. A válvula possui dois solenoides operados a 220 V, que direcionam o ar para controlar os movimentos de extensão e retração do cilindro.

Figura 36 - Válvula de controle do tipo 5/3 vias.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.4.4 Válvulas reguladoras de fluxo e mangueiras pneumáticas.

As válvulas reguladoras de fluxo (Figura 37) são utilizadas para controlar a vazão do ar nas saídas do pistão durante o acionamento da válvula de controle 5/3 vias. Esse controle de vazão permite ajustar de forma independente a velocidade de retração e extensão do pistão pneumático, limitando a vazão de ar que escapa no lado da retração ou da extensão do êmbolo.

Para transportar o ar comprimido do compressor para os componentes do sistema pneumático do equipamento, foram utilizadas mangueiras de poliuretano (PU) com diâmetro externo de 8 mm. Para conectar o equipamento ao compressor, foi montada uma entrada tipo engate rápido com 1/4", com o macho no equipamento e a fêmea na saída do compressor.

Figura 37 - Válvula pneumática reguladora de fluxo e mangueira PU.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.5 Compressor

Um compressor de ar Schulz, modelo Prático 50 L (2,0 Hp, 8,6 Csi, 220 V monofásico), e um filtro regulador de pressão foram utilizados para fornecer ar comprimido ao sistema. Esse modelo foi escolhido por sua compatibilidade com acessórios de mercado, adequação à demanda do equipamento e bom custo-benefício.

O filtro foi empregado para remover a umidade da linha e manter a pressão constante, regulada para 90 psi, durante os ensaios. A Figura 38 ilustra o compressor e a válvula utilizados. Para a montagem da linha, foram utilizados diversos conectores e uma mangueira de borracha de 10 metros, adequada para pressões de até 300 psi.

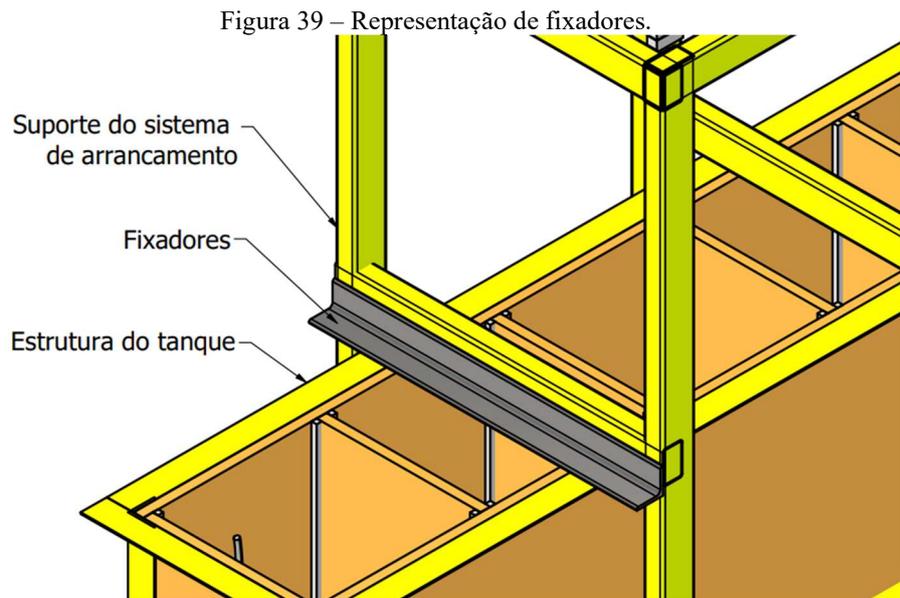
Figura 38 - Compressor de ar e filtro regulador.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.5.1 Fixadores

Os fixadores (Figura 39) foram desenvolvidos para restringir qualquer movimento relativo entre o sistema de arrancamento e o tanque durante os ensaios. Construídos com barras tipo cantoneira, os fixadores possuem parafusos e porcas soldados que, quando apertados, travam o conjunto, garantindo que ele funcione como uma única peça rígida.

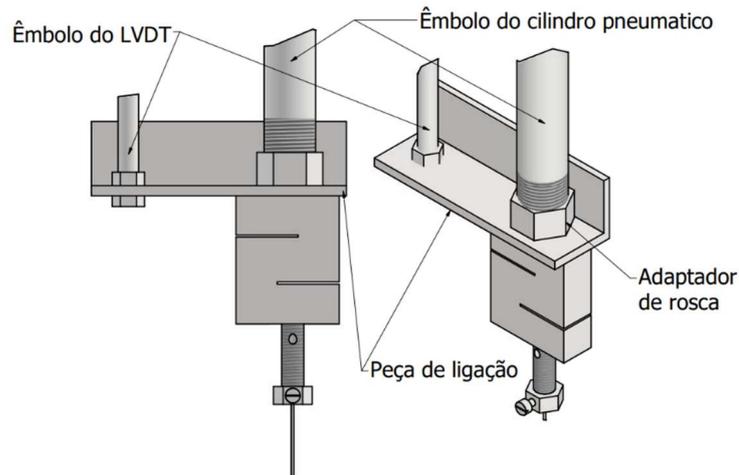


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.5.2 Ponteira para o cilindro

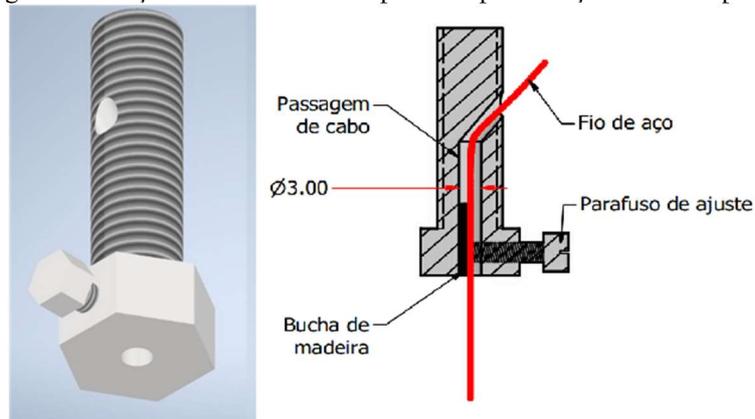
Para a leitura da posição do cilindro, foi confeccionada uma peça de ligação do cilindro para o sensor de posição com uma barra de cantoneira 40 mm x 40 mm, essa é fixada entre a célula de carga e a rosca na ponta do pistão do cilindro pneumático (Figura 40). Para a fixação da célula de carga no cilindro, foi necessário o desenvolvimento de um adaptador entre a rosca do cilindro pneumático e da célula de carga. Um parafuso perfurado foi utilizado como ponteira para a passagem do cabo de aço. Um parafuso lateral rosqueável no parafuso perfurado é utilizado para travar o cabo.

Figura 40 - Peça de ligação entre o cilindro e LVDT.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 41 - Peça confeccionada com parafuso para fixação do fio no pistão.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6 Sistemas de medição, de comando e de aquisição

Este item tem como objetivo detalhar os principais equipamentos utilizados para a medição direta de cargas e deslocamentos durante os ensaios, assim como os dispositivos empregados para a aquisição e registro dos dados.

#### 3.1.6.1 Transdutor Linear de posição

O transdutor linear de posição (LVDT), apresentado na Figura 42, foi utilizado para medir os deslocamentos das correntes. Com um curso de 150 mm, possui uma precisão linear

de  $\pm 0,05\%$ , resistência de  $5 \text{ k}\Omega \pm 20\%$  e repetibilidade de  $0,01 \text{ mm}$ . Para evitar danos ao LVDT, cujo curso é menor que o do cilindro, foi necessário instalar um limitador de curso.

Figura 42 - Transdutor linear de posição.



fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6.2 Célula de carga

A célula de carga do tipo S (ou Z), mostrada na Figura 43 foi utilizada para medir cargas mobilizadas durante ensaios de arrancamento das correntes. Com capacidade máxima de  $100 \text{ kg}$ , apresenta um erro combinado de  $\pm 0,03\%$ , sensibilidade de  $2,0 \pm 0,05 \text{ mV/V}$ , não sensibilidade de  $0,02\% \text{ F.S.}$  e tensão de excitação de  $5 \text{ VDC}$  a  $12 \text{ VDC}$ .

Figura 43 - Célula de carga tipo S.

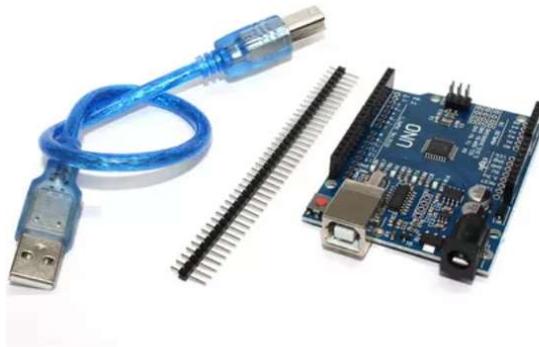


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6.3 Placa Arduino

Uma placa Arduino modelo UNO SMD R3 (Figura 44) foi utilizada para receber diretamente os sinais do transdutor linear de posição e do módulo amplificador da célula de carga, além de acionar os relés de controle da válvula 5/3 vias. A placa foi configurada com comandos programados para controlar o movimento do cilindro e enviar os dados de posição e carga em função do tempo durante os ensaios.

Figura 44 - Placa Arduino R3.

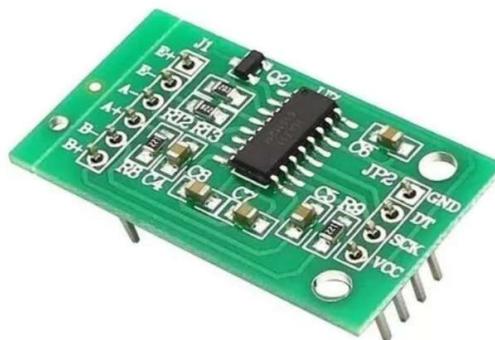


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6.4 Módulo conversor/amplificador

Um módulo conversor modelo HX711 (Figura 45) foi utilizado para converter as variações na resistência dos sensores de carga em dados digitais, utilizando um circuito ADC de 24 bits..

Figura 45 - Módulo amplificador HX711.

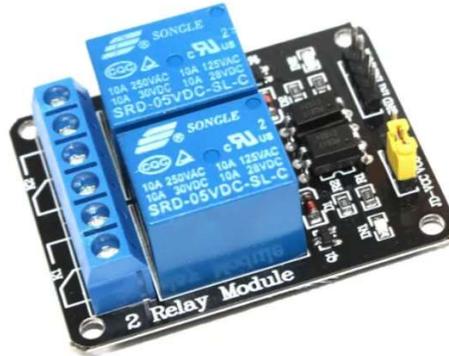


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6.5 Relés

Um módulo de relés de 2 canais com tensão de entrada 5V DC e saída 220V AC foi utilizado para receber o sinal do Arduino e acionar a válvula de controle que opera com 220v (Figura 46).

Figura 46 - Relé 2 canais 5v-220v 10A

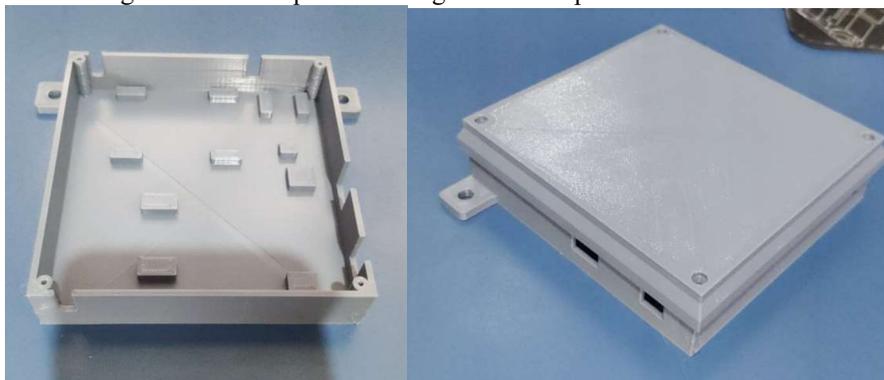


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.6.6 Caixa para instalação dos componentes eletrônicos

Para facilitar a montagem e proteger os componentes do sistema de aquisição, foi projetada em software 3D e impressa em PLA uma caixa de circuitos. Esta caixa abriga o Arduino, o módulo amplificador e o módulo de relés (Figura 47).

Figura 47 - Caixa para a montagem dos componentes eletrônicos.



Fonte: Autoria própria (2024).

Dentro da caixa, os componentes ficam protegidos e o usuário tem acesso à porta Serial e à entrada de 12V do Arduino. Para acionar os solenoides da válvula 5/3 vias através dos relés

5V/220V, foi acoplado um cabo com um plugue de três pinos 220V, que sai por um dos orifícios da caixa. Este cabo também está conectado ao aterramento dos componentes eletrônicos e de toda a estrutura metálica do equipamento.

### 3.1.6.7 Software

Para executar o controle do equipamento através do computador, foi desenvolvido um código para a placa Arduino que se comunica com o laptop através da porta Serial. O código fica armazenado na placa e pode ser utilizado em qualquer terminal.

As constantes definem os pinos utilizados, enquanto variáveis globais armazenam dados do teste, como carga lida, posição do sensor linear e limites de tempo e distância. No *setup*, a comunicação serial é iniciada, os pinos dos relés e do LED são configurados como saída, e a célula de carga é inicializada com os valores de *offset* e calibração. O LED é desligado, e o sistema está pronto para receber comandos.

No loop principal, o código verifica continuamente se há dados disponíveis na comunicação serial. Se dados forem encontrados, o comando é lido e a função correspondente (teste, subir ou descer) é chamada. Se o comando não for reconhecido, uma mensagem de erro é enviada ao terminal.

A função teste executa um ensaio de tração e solicita ao usuário a data do ensaio, o código do ensaio, o tempo limite, e a distância limite. Em seguida, o ensaio é iniciado, movendo o pistão para a posição zero e tarando a célula de carga. Durante o teste, a posição e a carga são lidas e exibidas continuamente através da porta Serial até que a posição ou o tempo limite seja atingido, ou até que o usuário aborte o teste. As funções *subir* e *descer* controlam a movimentação do pistão e mantêm o pistão subindo ou descendo até que a posição limite seja atingida.

Outra função incluída no código é a de parada, através do comando *p*, este interrompe qualquer um dos comandos e exibe a mensagem de *ensaio abortado*. O programa desenvolvido no software *Arduino IDE* está disponível no **Apêndice 1**.

Para operar o equipamento e implementar o salvamento automático do arquivo, foi necessário o desenvolvimento de um código em *Python* que se comunica com o Arduino através do cabo serial. Este foi programado para ler e enviar os dados, além de criar o arquivo de resultados e salvá-lo automaticamente através do *software* Visual Studio Code. Para operar o equipamento, basta rodar o *script* em um terminal *Python* quando conectado à porta serial do

Arduino e utilizar os comandos desenvolvidos anteriormente. O código também cria automaticamente um arquivo *.csv* quando detectado o comando *teste*, salvando todos os dados de tempo, posição e carga com o nome do arquivo igual ao código fornecido no início do comando *teste*. O script desenvolvido está disponível no **Apêndice 2**.

### 3.2 CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

A construção do equipamento iniciou-se com a montagem provisória dos componentes de madeira do tanque, previamente cortados pelo fornecedor. Em seguida, a estrutura metálica de suporte foi montada, assegurando encaixes precisos para facilitar a montagem e desmontagem dos painéis do tanque (Figura 48). Após essa etapa, as rodas foram instaladas e o suporte do cilindro foi fabricado (Figura 49).

Figura 48 - Fabricação da estrutura do tanque.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 49 - Montagem das rodas e fabricação do suporte do cilindro.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a conclusão do tanque e da estrutura de suporte, todos os componentes metálicos e as paredes do tanque foram pintados com esmalte sintético para metais e madeiras, respectivamente. No interior das paredes laterais, guias de alumínio com perfil quadrado de 8 mm x 8 mm foram fixados com parafusos. Com a estrutura do tanque finalizada a base para o cilindro foi confeccionada (Figura 50).

Figura 50 - Guias para anteparas e base do cilindro pneumático.



Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, todos os componentes prontos e acessórios do equipamento foram montados. Paralelamente, os componentes eletrônicos foram conectados, seguidos pela calibração e ajustes na programação (Figura 51).

Figura 51 - Equipamento montado e acessórios conectados.



Fonte: Autoria própria (2024).

O Quadro 1 apresenta os custos dos principais componentes utilizados no aparato experimental.

Quadro 1 – Quadro de custos dos principais componentes adquiridos.

<b>Orçamento Equipamento de Arrancamento de correntes</b>	
<b>Tanque e suporte</b>	
Componente	custo de aquisição
Estrutura metálica (Tubos e perfis metálicos)	R\$ 800,00
Rodas maciças com capacidade de 600 kg	R\$ 100,00
Compensado naval 15 mm, 220 mm x 240 cm + corte	R\$ 365,00
4 unidades de pés ajustáveis	R\$ 22,00
<b>Sistema de arrancamento</b>	

Componentes pneumáticos (Cilindro $\emptyset$ 63mm curso de 20 cm, válvulas reguladoras de fluxo, válvula de comando 5/3 vias, mangueiras e acessórios pneumáticos)	R\$ 450,00
Acessórios e parafusos	R\$ 50,00
Tinta	R\$ 100,00
Fio aço inox 200lbs rolo 10 metros	R\$ 42,00
Arduino Uno R3	R\$ 65,00
Módulo Hx711	R\$ 34,00
Relés e acessórios	R\$ 100,00
Sensor LVDT 15 cm	R\$ 440,00
Célula de carga tipo S 150 kg	R\$ 450,00
<b>TOTAL:</b>	<b>R\$ 3.018,00</b>
<b>Ferramentas</b>	
Compressor mod. Schulz Pratiko 50 L + acessórios	R\$ 1.700,00
<b>TOTAL + COMP.:</b>	<b>R\$ 4.718,00</b>

Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

A primeira seção deste item detalha o solo utilizado para validar o aparato experimental. Em seguida, são descritos os procedimentos para a preparação dos tanques de ensaio e a execução dos testes de arrancamento, incluindo o número de ensaios realizados.

#### 3.3.1 Descrição da areia

A areia fina foi utilizada nos ensaios de validação pela facilidade na interpretação dos resultados da interação solo-corrente, praticidade no manuseio e armazenamento quando seca, além da fácil aquisição. O material, coletado em uma jazida na região do Maciambu, Palhoça, foi escolhido por sua homogeneidade e pela possibilidade de coletas futuras, dada a continuidade da extração de areia na área. Antes do armazenamento, a areia foi lavada duas vezes na jazida para remover impurezas e materiais finos.

Como o foco deste trabalho é a concepção e montagem do aparato experimental, a caracterização detalhada dessa areia e de outros solos será realizada em estudos futuros.

### 3.3.2 Ensaio de Arrancamento de Corrente

Para validar o aparato experimental, foram realizados ensaios de arrancamento. Este item descreve os procedimentos adotados para a execução desses ensaios, os quais foram definidos com base em estudos anteriores e ajustados após os primeiros ensaios.

#### 3.3.2.1 Preparação dos tanques de ensaios

O processo de preparação dos ensaios inicia-se com a montagem dos painéis de madeira na estrutura metálica. Primeiro, é montado o painel de fundo, que contém o guia inferior para fixar as correntes. Em seguida, as duas paredes laterais são fixadas, estas possuem os trilhos para as anteparas. Por fim, os seis anteparas são inseridos nos trilhos. Com o tanque montado, as juntas são seladas com fita adesiva para evitar o vazamento de areia fina.

Após a montagem do tanque, as cinco correntes previamente preparadas com cabos de aço são posicionadas. Elas são fixadas primeiramente pelo último elo no guia inferior e pelo cabo de aço na porca soldada na chapa superior, com tensão suficiente para mantê-las esticadas, conforme mostrado na Figura 52.

Figura 52 - À esquerda tanque selado, no centro a corrente fixada e à direita o início do enchimento.



Fonte: Autoria própria (2024).

Com as correntes fixadas, a areia, previamente armazenada em bombonas plásticas de 180 litros e seca em estufa, é adicionada ao tanque. A areia é despejada de uma altura constante de aproximadamente 70 cm, utilizando uma colher grande, e compactada em camadas de cerca

de 15 cm com um soquete de metal. É importante notar que estudos futuros devem desenvolver técnicas aprimoradas para o preenchimento do tanque, garantindo a homogeneidade e a compacidade do solo nos níveis pré-estabelecidos (Figura 53).

Após o preenchimento dos compartimentos com areia, o tanque é posicionado sob o suporte do cilindro pneumático. O nivelamento do tanque e o correto alinhamento do fio de aço com o pistão são garantidos por um nível a laser, posicionado em duas direções ortogonais, assegurando o alinhamento da corrente, do cabo de aço e do pistão. A fixação do cabo no pistão é realizada por uma ponteira ajustável com um parafuso lateral (Figura 53).

Uma vez garantido o alinhamento, o tanque e o suporte do cilindro são fixados em posição relativa, utilizando travas desenvolvidas para evitar qualquer movimento que possa interferir nas leituras e nos resultados dos ensaios (Figura 53).

Figura 53 –A esquerda o enchimento, no centro a fixação e a direita o alinhamento do tanque.



Fonte: Autoria própria (2024).

Com o equipamento montado, realiza-se a conexão com o computador através do cabo serial. Além disso, é necessário conectar o equipamento a uma tomada de 220 V e um engate rápido de ar comprimido com pressão de 90 psi.

Nesta etapa, ajusta-se a velocidade do arrancamento através das válvulas de subida e descida do cilindro pneumático. São feitas movimentações do cilindro para verificar e ajustar os dados de posição e tempo. É crucial garantir o funcionamento correto do equipamento e do software durante todo o deslocamento do pistão.

### 3.3.2.2 Realização dos ensaios

Para validar o funcionamento adequado do aparato experimental desenvolvido, foram realizados 9 ensaios de arrancamento longitudinal de correntes verticais, combinando três diâmetros comerciais (3 mm, 4 mm e 5 mm) e três comprimentos base (10 cm, 30 cm e 50 cm). O ensaio é iniciado com o pistão na posição mais estendida, seguido pelo ajuste do cabo de aço. O comando de teste inicia a criação do arquivo de resultados, incluindo data, código, limites de tempo e distância do arrancamento.

Após a inserção dos dados, o Arduino envia comandos para iniciar o ensaio e escreve um cabeçalho com um resumo das informações. O pistão é estendido novamente por 3 segundos para equilibrar a pressão, e então inicia-se o movimento de retração para o arrancamento da corrente. Os ensaios foram realizados a uma velocidade próxima de 12 mm/min, que proporcionou um movimento contínuo e resultados mais consistentes. O deslocamento máximo foi estabelecido em 5 cm. Durante o ensaio, as informações digitais são convertidas em milímetros e gramas, e plotadas em uma coluna de dados com o tempo do ensaio em segundos, atualizadas na mesma taxa do Arduino.

Ao final do ensaio, a mensagem de "ensaio finalizado" aparece e o arquivo de resultados é salvo em formato .csv. Esse arquivo é utilizado para gerar o gráfico de carga *versus* deslocamento no Microsoft Excel. O procedimento é repetido para os ensaios subsequentes, liberando os fixadores do suporte do cilindro e ajustando o tanque ou o suporte na posição do próximo ensaio.

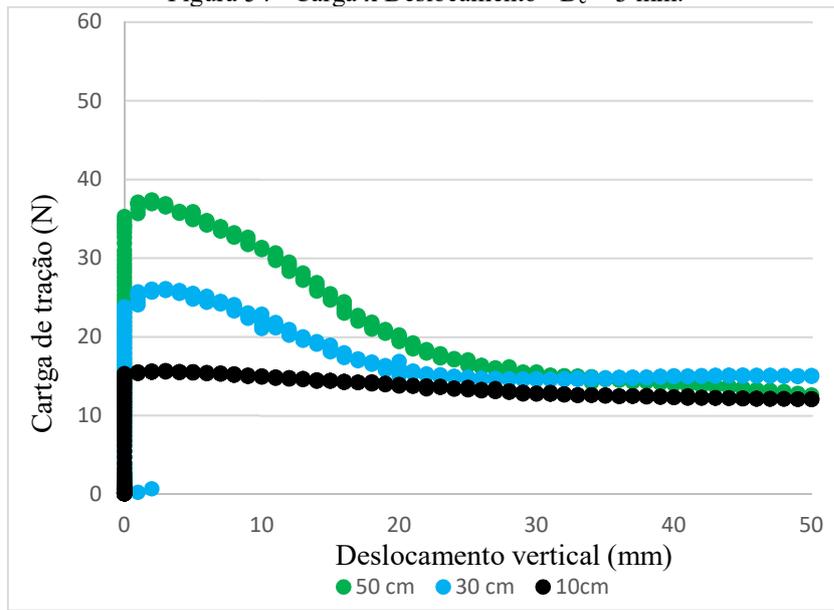
#### 4 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Este item apresenta os resultados dos 9 ensaios de arrancamento realizados para validar o funcionamento do equipamento. Os dados obtidos visam avaliar a influência do comprimento e do diâmetro das correntes nas cargas de tração medidas.

Os resultados dos ensaios de arrancamento estão apresentados nas Figura 54 a 56 para correntes com diâmetros comerciais de 3 mm, 4 mm e 5 mm, respectivamente. As curvas mostram que, para correntes com comprimentos de 30 cm e 50 cm, a carga mobilizada devido à interação solo-corrente aumenta até atingir um valor máximo (pico), após o qual diminui com o aumento do deslocamento da corrente. Esse comportamento, conhecido como *strain softening*, era esperado, pois está de acordo com os resultados obtidos por Kim (2017). Por outro lado, os ensaios com correntes de 10 cm de comprimento base não apresentam uma redução na carga com o aumento do deslocamento.

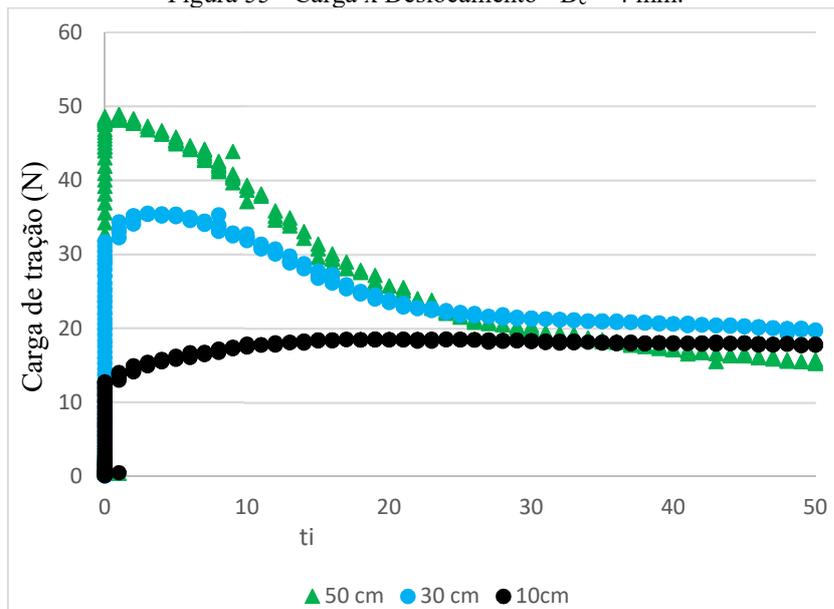
As curvas indicam que as cargas de pico ( $Q_p$ ) são alcançadas em deslocamentos menores que 5 mm e que seus valores aumentam com o diâmetro e o comprimento das correntes. No entanto, para deslocamentos superiores a 25 mm, as cargas tendem a se estabilizar, caracterizando um comportamento de cargas residuais ( $Q_r$ ). Com exceção do ensaio com corrente de 5 mm de diâmetro comercial e 50 cm de comprimento base, os resultados dos demais ensaios mostram que a carga residual não depende significativamente do comprimento das correntes, mas aumenta com o diâmetro das correntes, também de acordo com os resultados de Kim (2017).

Figura 54 - Carga x Deslocamento -  $D_c = 3$  mm.

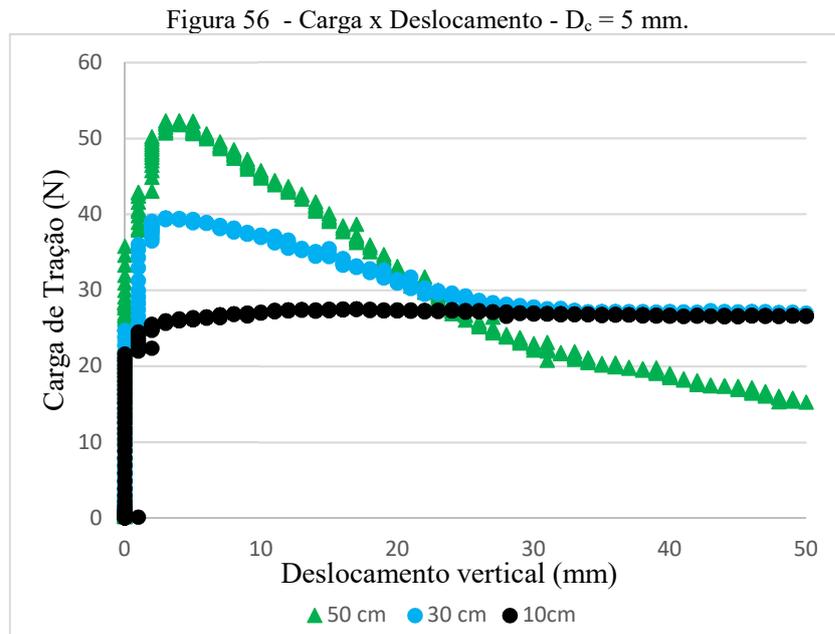


Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 55 - Carga x Deslocamento -  $D_c = 4$  mm.



Fonte: Autoria própria (2024).



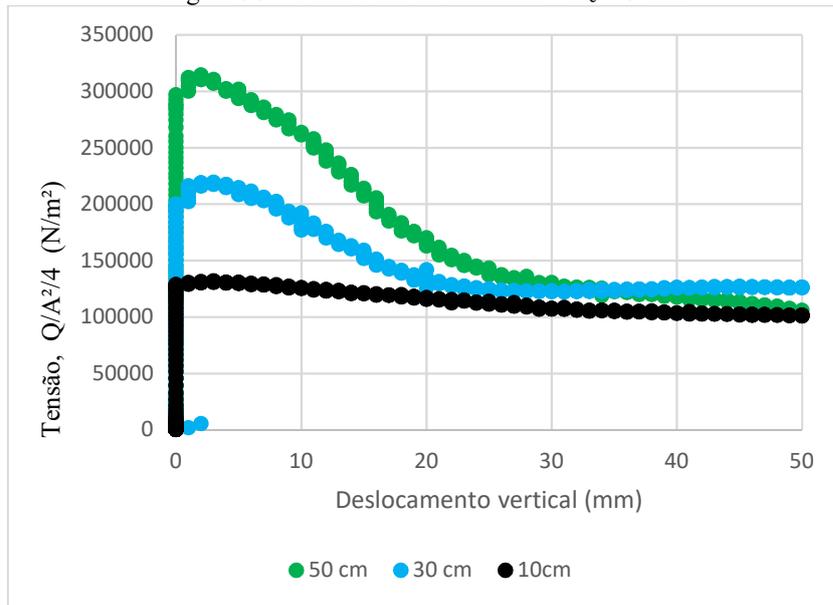
A Tabela 2 apresenta um resumo com os valores das cargas de pico e residual medidos nos ensaios de arrancamento.

Tabela 2 – Resumo das cargas de pico e residual medidos nos ensaios.

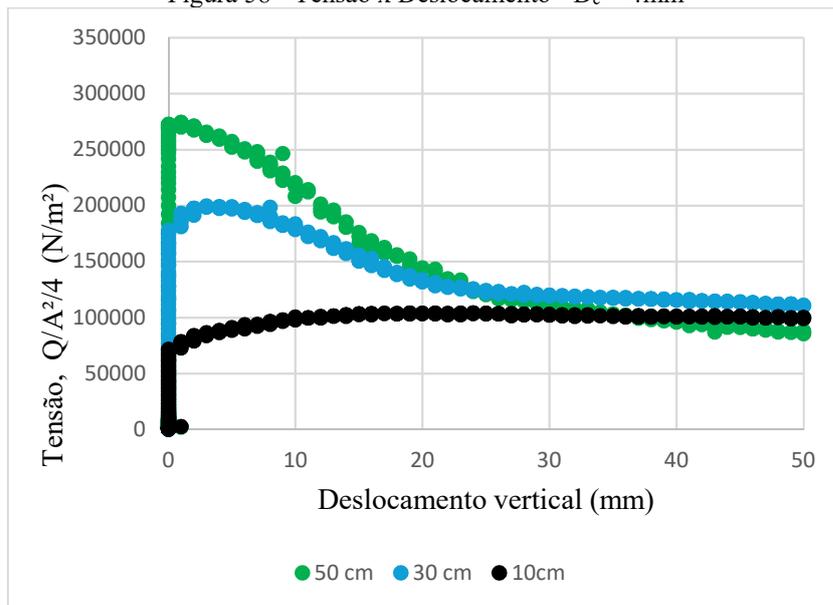
$L_b$ (cm)	$D_c = 3 \text{ mm}$		$D_c = 4 \text{ mm}$		$D_c = 5 \text{ mm}$	
	$Q_p$ (N)	$Q_r$ (N)	$Q_p$ (N)	$Q_r$ (N)	$Q_p$ (N)	$Q_r$ (N)
50	37,33	-	48,79	-	52,32	-
30	25,96	13,81	35,39	18,51	39,29	26,68
10	15,54	11,99	18,45	17,46	27,36	26,53

Fonte: Autoria própria (2024).

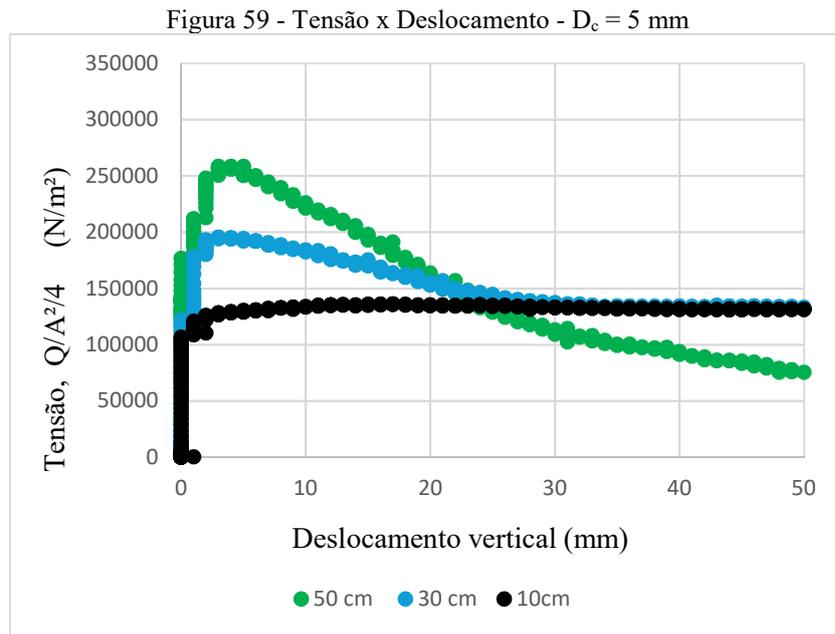
As figuras 57, 58 e 59 representam as curvas de tensão x deslocamento, onde área representa uma seção transversal da corrente com formato circular, com diâmetro igual a largura do elo (A). Observa-se que os valores encontrados possuem a mesma ordem de grandeza, com valores de tensão em torno de  $100 \text{ kN/m}^2$  para as correntes de 10 cm,  $200 \text{ kN/m}^2$  para as correntes de 30 cm e  $300 \text{ kN/m}^2$  para as correntes de 50 cm.

Figura 57 - Tensão x Deslocamento -  $D_c = 3 \text{ mm}$ 

Fonte: Autoria própria (2024).

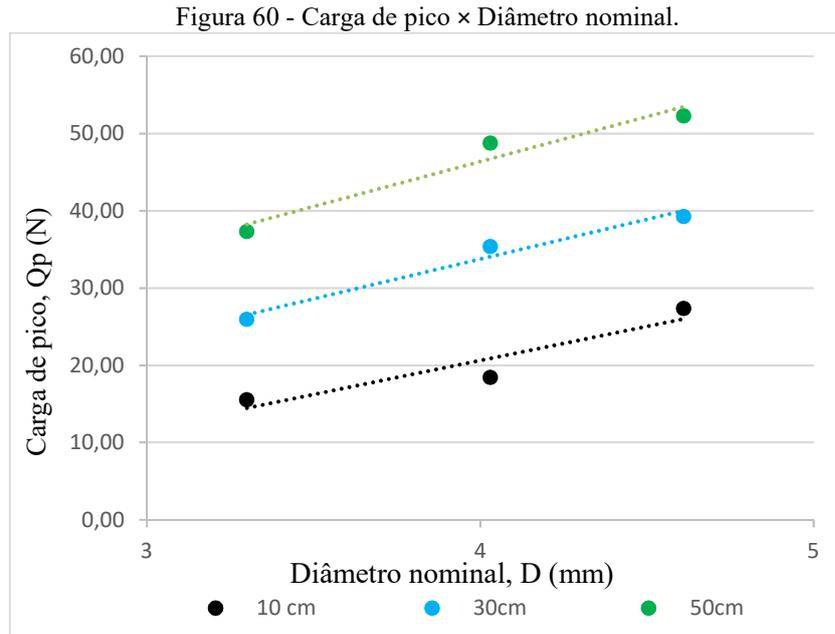
Figura 58 - Tensão x Deslocamento -  $D_c = 4 \text{ mm}$ 

Fonte: Autoria própria (2024).



A Figura 60 mostra a relação entre o diâmetro nominal das correntes e a carga de pico para diferentes comprimentos de correntes. A Figura 61 mostra a relação entre o comprimento das correntes e a carga de pico. A Figura 62 mostra a relação entre o diâmetro nominal das correntes e a carga residual. Observa-se que, para todos os comprimentos, a carga de pico aumenta linearmente com o diâmetro nominal das correntes. Da mesma forma, observa-se também aumento de cargas com o aumento do comprimento, para um dado deslocamento.

As equações das retas de ajuste foram estabelecidas e estão apresentadas nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.



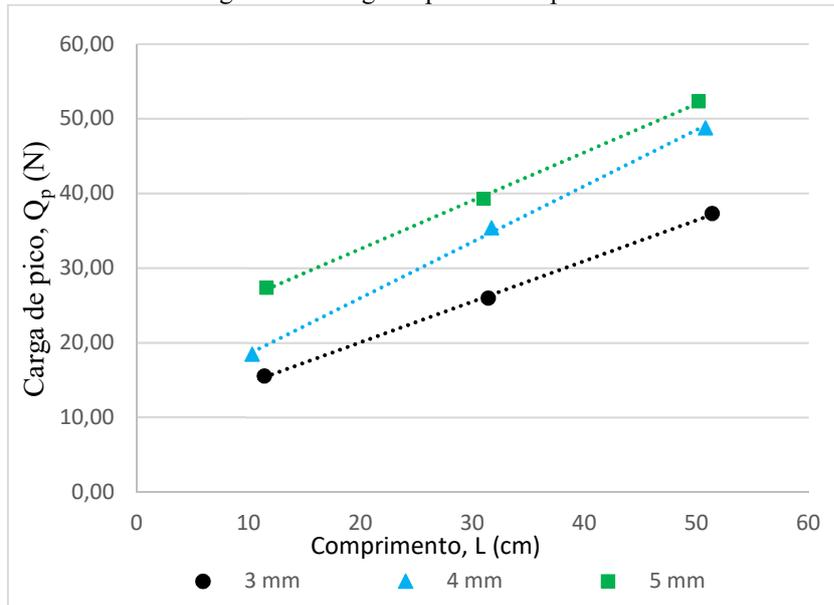
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 3 – Expressões que relacionam cargas de pico com diâmetros nominais de correntes.

$L_b$ (cm)	Equação	$R^2$
50	$Q_p = 11,595D$	0,948
30	$Q_p = 8,462D$	0,940
10	$Q_p = 5,204D$	0,731

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 61 - Carga de pico × Comprimento.



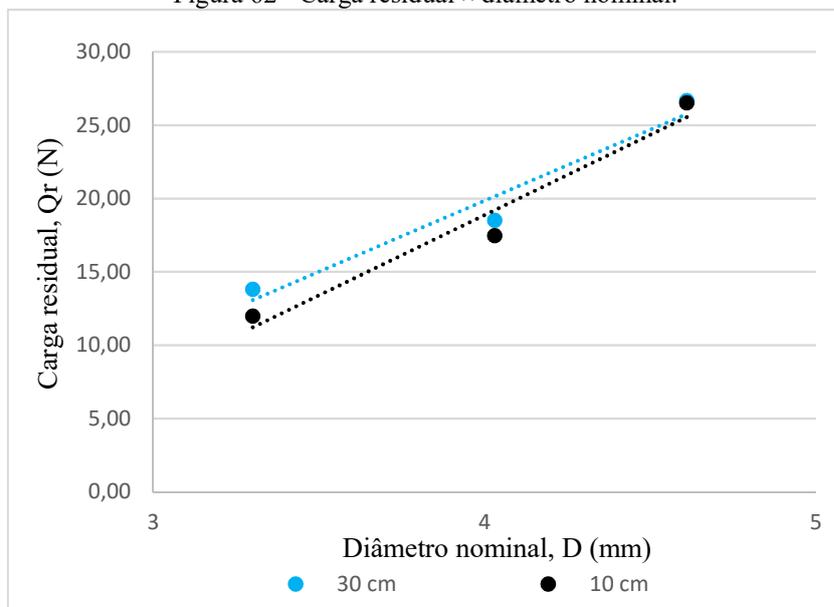
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 4 - Expressões que relacionam cargas de pico com comprimentos de correntes.

D <sub>c</sub> (mm)	Equação	R <sup>2</sup>
5	$Q_p = 0,6465L + 19,656$	0,999
4	$Q_p = 0,7501L + 11,008$	0,999
3	$Q_p = 0,5445L + 9,1779$	0,999

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 62 - Carga residual × diâmetro nominal.



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 5 - Expressões que relacionam cargas residuais com diâmetros nominais de correntes.

L (cm)	Equação	R <sup>2</sup>
30	$Q_r = 9,6785D - 18,857$	0,952
10	$Q_r = 10,942D - 24,888$	0,957

Fonte: Autoria própria (2024).

Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que o aparato experimental apresenta potencial para realizar futuros estudos sobre a interação solo-corrente de maneira simples, precisa e econômica. Entretanto mais testes ainda são necessários para uma validação completa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo conceber e montar um aparato experimental para realizar ensaios de arrancamento de correntes, visando futuros estudos sobre o mecanismo de interação solo-corrente. Para isso, foram considerados como referência principal os estudos de Rocha (2014) e Sampa (2015, 2019). As principais conclusões a seguir demonstram que os objetivos foram atingidos de forma satisfatória.

O projeto de concepção apresentou um nível de detalhamento adequado, permitindo sua implementação de maneira simples, econômica e segura. Contudo, ajustes adicionais são recomendados para melhorar a eficiência e viabilizar ensaios de arrancamento com correntes horizontais.

Os materiais utilizados na montagem do aparato são facilmente encontrados no mercado a preços acessíveis, o que facilita tanto a manutenção quanto a produção de novas unidades. As poucas peças exclusivas do projeto podem ser fabricadas a baixo custo.

O controle pneumático do equipamento mostrou-se eficaz, mas a regulagem, especialmente para velocidades inferiores a 10 mm/min, foi desafiadora, exigindo várias calibrações para garantir um movimento contínuo do pistão. Ajustes adicionais são necessários para aumentar a eficiência do equipamento.

O Arduino utilizado atendeu satisfatoriamente às demandas do projeto, embora o script desenvolvido para o controle do sistema e a aquisição de dados ainda precise de aprimoramentos para agilizar o processo de coleta e armazenamento.

O tanque de madeira demonstrou ser extremamente robusto e estável, mas melhorias são necessárias para facilitar o esvaziamento, devido ao elevado peso quando preenchido com solo e à falta de um método otimizado para a remoção das anteparas. O sistema de arrancamento funcionou bem, mas melhorias devem ser feitas para reduzir atrito durante o desprendimento da extremidade final das correntes.

Em conclusão, o equipamento desenvolvido para ensaios de arrancamento longitudinal de correntes mostrou-se eficiente, econômico e seguro, atendendo aos objetivos propostos. Os testes realizados com diferentes tipos de correntes confirmaram a capacidade do equipamento de medir com precisão as forças de tração durante o arrancamento. A validação do equipamento

por meio dos resultados dos ensaios evidencia sua robustez e confiabilidade, porém demanda de mais ensaios para validar os resultados obtidos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na experiência adquirida ao longo deste trabalho, as seguintes sugestões são recomendadas para futuros estudos:

- Aprimorar o software para facilitar o controle e automatizar o salvamento dos arquivos de resultados;
- Melhorar a vedação do tanque para possibilitar ensaios com solo saturado e submerso;
- Desenvolver um sistema de travas, guias e roldanas para permitir ensaios de arrancamento longitudinal horizontal no tanque;
- Otimizar o processo de preparação dos tanques, especialmente na etapa de retirada da areia para o reposicionamento das correntes entre ensaios consecutivos.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. S. S. et al. CPT and T-bar penetrometers for site investigation in centrifuge tests. **Soils and Rocks**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2011.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API. **Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms— working stress design**. API Recommended Practice 2A-WSD, Washington, U.S.A., 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10905 (MB2122):** Solo – Ensaio de palheta in situ. Rio de Janeiro: Abnt, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 12060 MB-3406:** Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro: Abnt, 1991.

AMARAL, C. S.; COSTA, A. M.; CARDOSO, C. O.; ANDUESA, A. **Previsão numérica da capacidade de carga dos pontos fixos de ancoragem da plataforma SS-11 e navio avaré no campo de coral considerando diferentes condições de inclinação e carregamento**. Relatório Parcial do Projeto. CENPES/PDEP/MC/COPPETEC/SERCON, Rio de Janeiro, 2002.

BANG, S.; TAYLOR, R. J; YU, J.; KIM, H. T. Analysis of anchor mooring lines in cohesive seafloor. **Transportation Research Record**, 1562, p. 47 – 56, 1996.

BANG, S.; RICHARDSON, R.; CHO, Y.; KIM, Y. S. Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge Model Tests on Mooring Lines. In: The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003a, Honolulu, U.S.A. **Proceedings...** 25-30 may. 2003.

CASTRO, F. A. **Estudo da interação entre risers, linhas de ancoragem e unidade flutuante do tipo turret**. 2008, 223p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

CHOI, Yongik et al. Horizontal pullout capacity of steel chain embedded in sand. In: **Advances in soil dynamics and foundation engineering**. 2014. p. 500-508.

DEAN, E. T. R. **Offshore geotechnical engineering Principles and practice**. London: Thomas Telford Limited, 554p, 2010.

D’SOUZA, R. B.; DOVE, P. G. S.; KELLY, P. J. Taut leg spread moorings: A costeffective alternative for deepwater platforms. In: 35th Annual Offshore Technology Conference, Paper 7203, 1993, Houston, U.S.A. **Proceedings...** 3-6 may 1993.

DEGENKAMP, G.; DUTTA, A. Soil resistances to embedded anchors chain in soft clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 115, n. 10, oct. 1989.

GAULT, J. A.; COX, W. R. Method for predicting geometry and load distribution in an anchor chain from a single point mooring buoy to buried anchorage. In: Sixth Annual

Offshore Technology Conference, Paper 2062, 1974, Houston, U.S.A. **Proceedings...**6-8 may. 1974.

HERNÁNDEZ, A. O. V. **Metodologia de calibração de fatores parciais de segurança para projetos de linhas de ancoragem baseada em confiabilidade**. 2004, 143p. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

HOUSE, A. R. **Suction caisson formulation for buoyant offshore facilities**. 2002, Thesis (Doctor in Civil Engineering) – University of Western Australia, Perth, 2002.

KIM, Byeongwan et al. Static pullout resistance of anchor chains in cohesionless soil—laboratory testing. **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 35, n. 6, p. 780-787, 2017.

LIU, H.; LIU, C. L.; ZHAO, Y. B.; WANG, C. Reverse catenary equation of the embedded installation line and application to the kinematic model for drag anchors. **Applied Ocean Research**. Western Cape, South Africa, v. 43, p. 80 – 87, 2013.

KUNITAKI, D. M. K. N. **Tratamento de Incertezas no Comportamento Dinâmico de Estacas Torpedo para Ancoragem de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore**. 2006, 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

KWON, Youngcheul et al. Pullout resistance characteristics of chain type retaining system. **Int J Phys Sci**, v. 5, p. 1344-1359, 2010.

MEDEIROS JR., C. J. Low cost anchor system for flexible risers in deep waters. In: Annual Offshore Technology Conference, Paper 14151, 2002, Houston, U.S.A. **Proceedings...**2002.

MORAIS, JOSÉ MAURO DE. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. IPEA: Petrobras, Brasília, 2013.

NEUBECKER, S. R.; RANDOLPH, M. F. Profile and frictional capacity of embedded anchor chains. **Journal of Geotechnical Engineering**. New York, v. 121, n. II, Nov. 1995a.

RANDOLPH, M. F. et al. Challenges of offshore geotechnical engineering. In: 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – (ICSMGE), 2005, Osaka, Japan. **Proceedings...** p. 123-176, 2005.

ROCHA, C. M. **Atenuação de cargas estáticas em linhas de ancoragem**. 2014, 209p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2014 RUI, Shengjie et al. Axial interaction between anchor chain and sand. Part I: Monotonic loading test. **Applied Ocean Research**, v. 113, p. 102761, 2021.

SAMPA, N. C. **Atenuação de cargas dinâmicas em linhas de ancoragem de plataformas offshore**. 2015, 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

SAMPA, Naloan Coutinho. **Modelagens dos mecanismos de interação de linhas de ancoragem de plataformas offshore em solos argilosos**. 2019. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS - BR Doutor em Engenharia. 2019.

SAMPA, N. C. Plataformas Offshore e Sistemas de Ancoragem: Revisão de Literatura. 2022.

VIVATRAT, V.; VALENT, P. J.; PONTEIRO, A. A. The influence of chain friction on anchor pile design. In: 14th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4148, 1982, Houston, U.S.A. Proceedings... 3-6 may. 1982.

VRYHOF ANCHORS. Anchor Manual 2010: The Guide to Anchoring. Netherlands 2010.

YEN, B. C.; TOFANI, G. D. Soil resistance to stud link chain. In: 16th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4769, 1984, Houston, U.S.A. **Proceedings...** 7-9 may. 1984.

ZHANG, WEI. **Penetration mechanism and kinematic behavior of drag anchors**. 2011, 206p. Thesis (Doctor in Civil Engineering), Tianjin University, Tianjin, 2011.

## APÊNDICE 1 - SCRIPT DESENVOLVIDO PARA O ARDUINO

```

#include <HX711.h>

const int HX711_dout = 4;
const int HX711_sck = 5;
const int releSubida = 6;
const int releDescida = 7;
const int sensorLinear = A0;
String comando;
String data;
String identificador;
int leituraCarga;
long valorOffset = 42891;
float valorDeCalibracao = 42.923004;
int leituraLinear;
int posicao;
int distanciaLimiteMm;
unsigned long tempoLimiteMilissegundos;
unsigned long inicioDoTeste;

HX711 celulaDeCarga;

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  pinMode(releSubida, OUTPUT);
  pinMode(releDescida, OUTPUT);
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  celulaDeCarga.begin(HX711_dout, HX711_sck);
  celulaDeCarga.set_offset(valorOffset);
  celulaDeCarga.set_scale(valorDeCalibracao);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  Serial.println("Digite 'teste' para iniciar o teste, 'subir' para mover o pistao para o ponto mais
alto e 'descer' para mover o pistao para o ponto mais baixo");
  digitalWrite(releSubida, HIGH);
  digitalWrite(releDescida, HIGH);
}

void loop() {

  if(Serial.available()){
    comando = Serial.readStringUntil('\n');
    if(comando == "teste"){
      teste();
    }else if(comando == "subir"){
      subir();
    }
  }
}

```

```

    }else if(comando == "descer"){
        descer();
    }else{
        Serial.println("Entrada incorreta!");
    }
    delay(100);
}

}

void teste(){
    Serial.println("Digite a data do ensaio (DD/MM/AAAA): ");
    while(!Serial.available()){ }
    Serial.setTimeout(30000);
    data = Serial.readStringUntil('\n');
    Serial.println("Digite o código do ensaio: ");
    identificador = Serial.readStringUntil('\n');
    Serial.println("Digite o tempo limite (em minutos): ");
    tempoLimiteMilissegundos = Serial.parseInt() * 60000;
    Serial.println("Digite a distancia limite (em centimetros): ");
    distanciaLimiteMm = Serial.parseInt()*10;
    Serial.print("Iniciando ensaio ");
    Serial.print(identificador);
    Serial.print(" em ");
    Serial.println(data);
    Serial.print("Tempo limite: ");
    Serial.println(tempoLimiteMilissegundos/60000);
    Serial.print("Distancia limite: ");
    Serial.println(distanciaLimiteMm/10);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    Serial.println("Indo para posicao zero");
    digitalWrite(releDescida, LOW);
    delay(5000);
    leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
    while(leituraLinear > 0){
        leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
        delay(10);
    }
    digitalWrite(releDescida, HIGH);
    delay(100);
    celulaDeCarga.tare();
    Serial.println("Iniciando tracao");
    Serial.println("Tempo da medicao,posicao,Carga");
    leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
    posicao = map(leituraLinear,0,973,0,145);
    leituraCarga = celulaDeCarga.get_units(8);
    digitalWrite(releSubida, LOW);
    inicioDoTeste = millis();
}

```

```

while(posicao < distanciaLimiteMm || posicao < 145 || (millis() - inicioDoTeste) <
tempoLimiteMilissegundos){
  leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
  leituraCarga = celulaDeCarga.get_units(8);
  posicao = map(leituraLinear,0,973,0,145);
  Serial.print((millis()-inicioDoTeste)/1000);
  Serial.print(",");
  Serial.print(posicao);
  Serial.print(",");
  Serial.println(leituraCarga);
  if(Serial.available()){
    comando = Serial.readStringUntil('\n');
    if(comando == "p" || comando == "P"){
      digitalWrite(releDescida, HIGH);
      Serial.print("Teste ");
      Serial.print(identificador);
      Serial.println(" abortado!");
      return;
    }
  }
}
digitalWrite(releSubida, HIGH);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
Serial.print("Teste ");
Serial.print(identificador);
Serial.println(" Finalizado");
Serial.println("Digite 'teste' para iniciar o teste, 'subir' para mover o pistao para o ponto mais
alto e 'descer' para mover o pistao para o ponto mais baixo");
}

```

```

void subir(){
  Serial.println("Subindo");
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  digitalWrite(releSubida, LOW);
  leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
  while(leituraLinear < 973){
    leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
    posicao = map(leituraLinear,0,973,0,145);
    Serial.println(posicao);
    if(Serial.available()){
      comando = Serial.readStringUntil('\n');
      if(comando == "p" || comando == "P"){
        digitalWrite(releSubida, HIGH);
        Serial.print("Subida ");
        Serial.println(" abortada!");
        return;
      }
    }
  }
  delay(10);
}

```

```

}
Serial.println("Parando");
digitalWrite(releSubida, HIGH);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
Serial.println("Digite 'teste' para iniciar o teste, 'subir' para mover o pistao para o ponto mais
alto e 'descer' para mover o pistao para o ponto mais baixo");
}

void descer(){
Serial.println("Descendo");
digitalWrite(releDescida, LOW);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
while(leituraLinear > 0){
leituraLinear = analogRead(sensorLinear);
posicao = map(leituraLinear,0,973,0,145);
Serial.println(posicao);
if(Serial.available()){
comando = Serial.readStringUntil('\n');
if(comando == "p" || comando == "P"){
digitalWrite(releDescida, HIGH);
Serial.print("Subida ");
Serial.println(" abortada!");
return;
}
}
delay(10);
}
Serial.println("Parando");
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(releDescida, HIGH);
Serial.println("Digite 'teste' para iniciar o teste, 'subir' para mover o pistao para o ponto mais
alto e 'descer' para mover o pistao para o ponto mais baixo");
}

```

## APÊNDICE 2 - CÓDIGO PYTHON PARA CONTROLE E SALVAMENTO

```

import serial # pip install pyserial
import threading

porta = "COM8" # Colocar porta serial do Arduino
baud = 115200
comando_parar = False
arquivo = None
file = None

def enviar_comando(ser, comando):
    ser.write((comando + '\n').encode('utf-8'))

def monitorar_comandos(ser):
    global comando_parar
    while True:
        comando = input().strip()
        if comando == 'P':
            comando_parar = True
            enviar_comando(ser, comando)
        elif comando == "sair":
            print("Encerrando o script.")
            enviar_comando(ser, 'P') # Garantir que o Arduino pare qualquer operação
            comando_parar = True
            break
        else:
            enviar_comando(ser, comando)

def main():
    global comando_parar, arquivo, file

    try:
        with serial.Serial(porta, baud, timeout=1) as ser:
            ser.reset_input_buffer()
            print("Abrindo Serial")

            while True:
                print("Digite 'teste' para iniciar o teste, 'subir' para mover o pistão para o ponto mais
                alto, 'descer' para mover o pistão para o ponto mais baixo, ou 'sair' para encerrar:")
                comando = input().strip()
                if comando == 'sair':
                    enviar_comando(ser, 'P') # Garantir que o Arduino pare qualquer operação
                    print("Encerrando o script.")
                    break
                enviar_comando(ser, comando)

```

```

if comando == 'teste':
    print("Digite o código do ensaio:")
    codigo_ensaio = input().strip()
    arquivo = f"{codigo_ensaio}.csv"

    file = open(arquivo, "a")
    print(f"Arquivo {arquivo} criado")

    # Inicializa a thread para monitorar os comandos do usuário
    thread_comandos = threading.Thread(target=monitorar_comandos, args=(ser,))
    thread_comandos.daemon = True
    thread_comandos.start()

while True:
    if ser.in_waiting > 0:
        data = ser.readline().decode('utf-8').strip()
        print(f"Recebido do Arduino: {data}") # Mensagem de depuração

        # Processar perguntas do Arduino
        if "Digite a data do ensaio" in data:
            data_ensaio = input("Data do ensaio (DD/MM/AAAA): ")
            enviar_comando(ser, data_ensaio)
        elif "Digite o código do ensaio" in data:
            # Já inserido anteriormente
            enviar_comando(ser, codigo_ensaio)
        elif "Digite o tempo limite" in data:
            tempo_limite = input("Tempo limite (em minutos): ")
            enviar_comando(ser, tempo_limite)
        elif "Digite a distancia limite" in data:
            distancia_limite = input("Distância limite (em centímetros): ")
            enviar_comando(ser, distancia_limite)

        # Se os dados forem relevantes para o CSV, salvar
        if "," in data:
            file.write(data + "\n")

        # Verificar se o ensaio foi finalizado
        if "Finalizado" in data:
            print("Ensaio finalizado. Pronto para novos comandos.")
            comando_parar = False
            break

    if comando_parar:
        break

file.close()
print("Loop de comandos finalizado. Aguardando novos comandos...")

except serial.SerialException as e:

```

```
print(f'Erro na comunicação serial: {e}')

except Exception as e:
    print(f'Ocorreu um erro: {e}')

if __name__ == "__main__":
    main()
```