



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA ATUADOR
PNEUMÁTICO APLICADO EM ENSAIOS CENTRÍFUGOS DE MODELOS DE
TORRES EÓLICAS *OFFSHORE*

Pedro Lobato Dias

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Ramon R. Costa

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA ATUADOR
PNEUMÁTICO APLICADO EM ENSAIOS CENTRÍFUGOS DE MODELOS DE
TORRES EÓLICAS *OFFSHORE*

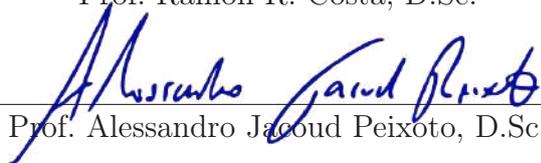
Pedro Lobato Dias

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO DE AUTOMAÇÃO.

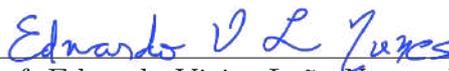
Examinado por:



Prof. Ramon R. Costa, D.Sc.



Prof. Alessandro Jacoud Peixoto, D.Sc.



Prof. Eduardo Vieira Leão Nunes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2023

Dias, Pedro Lobato

Desenvolvimento de sistema de controle para atuador pneumático aplicado em ensaios centrífugos de modelos de torres eólicas *offshore*/Pedro Lobato Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2023.

XII, 60 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Ramon R. Costa

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 58 – 60.

1. Torres Eólicas *Offshore*. 2. Controle de Força.
3. Modelagem Centrífuga. I. R. Costa, Ramon. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

À minha mãe, Carla.

Agradecimentos

À minha mãe, por todo o carinho, apoio e sacrifícios feitos para que este momento chegasse.

À minha família por todo o apoio e incentivo.

Aos professores Márcio Almeida e Maria Cascão pela oportunidade de participar desse projeto e por toda confiança em mim depositada.

À Sílvia Lemos por todos os ensinamentos, conselhos, apoio e confiança.

Ao Willian Filho por todo os ensinamentos, companheirismo, confiança e inspiração profissional.

Aos meus amigos Priscilla Velloso e Lucas Chinem pela ajuda e apoio durante este período.

À todos os membros do LM²C/COPPE pela amizade e acolhimento.

Ao meu orientador, Ramon Costa, por ter aceitado o convite para orientar este trabalho.

Aos membros da banca, por terem aceitado o convite para examinar este trabalho.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Automação.

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA ATUADOR
PNEUMÁTICO APLICADO EM ENSAIOS CENTRÍFUGOS DE MODELOS DE
TORRES EÓLICAS *OFFSHORE*

Pedro Lobato Dias

Dezembro/2023

Orientador: Ramon R. Costa

Curso: Engenharia de Controle e Automação

As torres eólicas *offshore* já se equiparam na importância das torres eólicas *onshore* e se encontram como uma das fontes de energia com maior investimento e potencial de crescimento no país. Este estudo tem como objetivo desenvolver um aparato para que possa ser possível simular a influência de carregamentos cíclicos de fontes naturais como ventos na estabilidade de fundações de torres eólicas offshore do tipo *monopile* através da modelagem física em centrífuga geotécnica. Desenvolveu-se, então, um sistema de controle de força para um atuador pneumático que fosse controlado através de um *software* em um computador externo à centrífuga com objetivo de automatizar e controlar a ação de carregamentos na fundação. Foram realizados 8 ensaios de carregamentos cíclicos, abrangendo diferentes quantidades de iterações, incluindo 1.000, 10.000, 50.000 e 100.000 ciclos. Os resultados apresentados neste trabalho têm por objetivo contribuir para o aprimoramento da compreensão sobre fundações de torres eólicas *offshore*.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A PNEUMATIC
ACTUATOR APPLIED IN CENTRIFUGE TESTS OF OFFSHORE WIND
TURBINE TOWER MODELS.

Pedro Lobato Dias

December/2023

Advisor: Ramon R. Costa

Course: Automation and Control Engineering

Offshore wind towers are now on par with the importance of onshore wind towers and stand as one of the energy sources with the highest investment and growth potential in the country. This study aims to develop a device to simulate the influence of cyclic loads from natural sources such as wind on the stability of monopile-type offshore wind tower foundations through physical modeling in a geotechnical centrifuge. Consequently, a force control system was developed for a pneumatic actuator, which could be controlled through software on an external computer to the centrifuge, with the goal of automating and controlling the loading action on the foundation. Eight cyclic loading tests were conducted, spanning different numbers of iterations, including 1,000, 10,000, 50,000, and 100,000 cycles. The results presented in this work aim to contribute to the enhanced understanding of offshore wind tower foundations.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Layout do trabalho	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Torres eólicas offshore	3
2.1.1 Tipos de fundação	3
2.1.2 Carregamentos	5
2.1.3 Tipos de movimentação	7
2.2 Modelagem centrífuga	9
2.2.1 Lei das escalas	9
2.3 Sistemas de controle	10
2.3.1 Controle de malha aberta	10
2.3.2 Controle de malha fechada	10
2.3.3 Controlador de duas posições ou <i>ON/OFF</i>	11
3 Materiais e métodos	12
3.1 Materiais e Equipamentos	12
3.1.1 Amostra de solo arenoso	12
3.1.2 Centrífuga geotécnica	14
3.1.3 Torre eólica <i>offshore</i>	16
3.1.4 Atuadores vertical e horizontal	18
3.1.5 Atuador cíclico	19
3.1.6 Válvulas solenoides e de regulação de fluxo	19
3.1.7 Alimentação e regulagem de pressão de ar comprimido	21
3.1.8 Célula de carga	21
3.2 Instrumentação	22
3.2.1 Circuito de acionamento	22

3.2.2	Circuito de condicionamento da célula de carga	23
3.2.3	Placa de circuito e caixa de automação	29
3.2.4	Calibração da célula de carga	30
3.2.5	<i>Softwares</i>	35
3.3	Procedimentos e funcionamento do sistema	38
3.3.1	Procedimentos do ensaio centrífugo	38
3.3.2	Sistemas de controle	40
4	Resultados e Discussões	42
4.1	Controle de frequência	42
4.2	Controle de força	43
4.2.1	Ensaio de 1.000 ciclos	44
4.2.2	Ensaio de 10.000 ciclos	47
4.2.3	Ensaio de 50.000 ciclos	50
4.2.4	Ensaio de 100.000 ciclos	53
5	Conclusões e próximos trabalhos	56
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	57
	Referências Bibliográficas	58

Lista de Figuras

2.1	Tipos de fundações fixas para torres eólicas <i>offshore</i>	4
2.2	Tipos de carregamentos em torres eólicas.	6
2.3	Movimentação <i>One-Way</i>	8
2.4	Movimentação <i>Two-Way</i>	8
2.5	Diagrama de blocos de sistema em malha aberta.	10
2.6	Diagrama de blocos de sistema em malha fechada.	11
2.7	Ação de controle de duas posições <i>ON/OFF</i>	11
3.1	Amostra de solo arenoso pluviada.	13
3.2	Pluviador automático.	13
3.3	Centrífuga de Braço do LM ² C.	14
3.4	Caixa balanço com amostra pluviada.	15
3.5	Comportamento da caixa retangular tipo balanço em repouso e em voo. (Broadbent Inc, 2011) [1]	15
3.6	Esquemáticos de turbina eólica <i>offshore</i> , protótipo simplificado e modelo.	17
3.7	Modelo fabricado e desenho com suas dimensões.	17
3.8	Servo atuador bidirecional (Broadbent, 2011)[1].	18
3.9	Cravação do modelo na amostra de solo.	18
3.10	Cilindro Pneumático MQMLBL6H-15D.	19
3.11	Válvula solenoide VQD1151-5L-M5.	19
3.12	Válvula reguladora de fluxo AS1201F.	20
3.13	Sistema pneumático do ensaio.	20
3.14	Sistema de tratamento e regulagem de ar comprimido e transdutor de pressão.	21
3.15	Célula de carga LC202-50.	22
3.16	Circuito de de acionamento de válvulas.	23
3.17	Diagrama de blocos do sinal da célula de carga.	24
3.18	Circuito de condicionamento da célula de carga.	25
3.19	Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.	25
3.20	Circuito usado para simulação.	28

3.21	Resultado da simulação - Tensão (V) x Força (N).	28
3.22	Placa de circuito e caixa de automação do projeto.	29
3.23	Massas utilizadas no processo de calibração.	30
3.24	Sistema de calibração por compressão.	31
3.25	Ciclos de carregamento e descarregamento de compressão.	32
3.26	Curva de calibração de compressão.	32
3.27	Sistema de calibração por tração.	33
3.28	Ciclos de carregamento e descarregamento de tração.	34
3.29	Curva de calibração de tração.	34
3.30	<i>Software</i> de aquisição de dados.	36
3.31	<i>Software TEO Sys</i> próprio para automação.	36
3.32	Fluxograma de procedimentos do ensaio.	38
3.33	Vista do sistema embarcado em repouso.	39
3.34	Vista do sistema embarcado em voo.	40
3.35	Diagrama de blocos do sistema de controle de força.	41
4.1	Gráfico de força (N) por tempo (s) de um ensaio por controle de frequência.	42
4.2	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 1.	44
4.3	Período inicial e final do ensaio 1.	44
4.4	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 2.	45
4.5	Período inicial e final do ensaio 2.	45
4.6	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 3.	47
4.7	Período inicial e final do ensaio 3.	47
4.8	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 4.	48
4.9	Período inicial e final do ensaio 4.	48
4.10	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 5.	50
4.11	Período inicial e final do ensaio 5.	50
4.12	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 6.	51
4.13	Período inicial e final do ensaio 6.	51
4.14	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 7.	53
4.15	Período inicial e final do ensaio 7.	53
4.16	Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 8.	54
4.17	Período inicial e final do ensaio 8.	54

Lista de Tabelas

2.1	Lei das escalas.	9
3.1	Dimensões de protótipo e modelo.	16
3.2	Valor das massas para calibração.	30
3.3	Comparação entre métodos de calibração.	35
4.1	Ensaio de controle de força, suas quantidades de ciclos e valores de <i>setpoint</i>	43
4.2	Comparação entre ensaios de 1.000 ciclos.	46
4.3	Comparação entre ensaios de 10.000 ciclos.	49
4.4	Comparação entre ensaios de 50.000 ciclos.	52
4.5	Comparação entre ensaios de 100.000 ciclos.	55

Capítulo 1

Introdução

O vento é uma indústria extrativista, termo utilizado devido ao fato de turbina eólica extrair uma fração da energia cinética do vento que sopra através da área superficial do rotor de uma turbina eólica (EWEA, 2009) [2]. Em um mundo gradativamente mais preocupado e disposto a cuidar do meio ambiente, este tipo de fonte de energia vem se tornando cada vez mais importante e presente no território nacional e internacionalmente.

Uma das grandes vantagens dos parques eólicos *offshore* em relação aos parques *onshore* é a redução dos obstáculos que atenuam a ação dos ventos nas torres. A capacidade de explorar maiores velocidades de vento alavancou o desenvolvimento de turbinas maiores e, por consequência, permitiu a maior geração de energia.

De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC, 2023) [3], o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), já recebeu propostas de criação de energia eólica *offshore* de mais de 170GW (giga-watt). Este valor é equiparável à produção inteira da matriz de energia brasileira em operação, que é de 197GW, de acordo com a ferramenta Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) denominado de SIGA (ANEEL, 2023) [4]. Apesar do país não possuir demanda para tais valores de energia, a apresentação destes dados corrobora a afirmação de que o país está se tornando um ótimo *hub* de investimento de geração de energia limpa.

A pesquisa a ser apresentada tem por propósito desenvolver um sistema de instrumentação capaz de simular o comportamento de fundações de turbinas eólicas *offshore*, do tipo *monopile*, submetidas a carregamentos laterais cíclicos através da modelagem física em centrífuga geotécnica. O trabalho foi sediado no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) – COPPE/UFRJ. Um sistema de controle de força aplicado a um atuador pneumático foi desenvolvido com objetivo de aplicar carregamentos de força no modelo de fundação. Este aparato foi integrado a um sistema eletrônico para automação, também desenvolvido para a pesquisa, que por sua vez será controlado via software próprio por um computador embarcado.

Este computador embarcado é operado por um segundo computador externo a centrífuga através de conexão via fibra óptica. É fundamental destacar que o sistema apresentou ser robusto o suficiente para suportar longos períodos de carregamento de força, visto que ocorreram ensaios com 1.000, 10.000, 50.000 e 100.000 ciclos de carregamento, bem como operar em um ambiente com aceleração da gravidade aumentada em até 100 vezes.

1.1 Objetivo

Desenvolver um sistema de controle de força aplicado por um atuador pneumático permitindo assim simular, através de modelos centrífugos, o comportamento de fundações de torres eólicas *offshore* submetidas a carregamentos laterais cíclicos de longo prazo.

1.2 Layout do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo este de introdução.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre temas relacionados ao trabalho, como: torres eólicas *offshore*, modelagem centrífuga e sobre sistemas de controle, especialmente controle discreto do tipo *ON/OFF*.

O capítulo 3 apresenta toda a metodologia utilizada para construção do *setup* de ensaios e todos os equipamentos e instrumentação utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados do sistema sem aplicação de controle e com a aplicação do controle de força.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para próximos trabalhos e pesquisas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Torres eólicas offshore

2.1.1 Tipos de fundação

Manweell (2009) [5] define como estrutura de suporte a união de três componentes de uma torre eólica *offshore*, a torre, a subestrutura e a fundação. A torre é definida como componente que conecta a subestrutura ao rotor e à nacelle. A subestrutura é a parte da estrutura que se estende desde o fundo do mar até a torre. Já a fundação é a parte da estrutura abaixo do fundo do solo marinho que tem por função transferir as cargas atuantes na estrutura para o solo. Ainda de acordo com Manwell (2009) [5] a fundação de uma torre eólica deve ser suficiente para manter a turbina na posição vertical e estável sob as mais extremas condições de projeto.

A escolha de uma fundação para torre eólica deve levar em conta diversos aspectos, são eles: profundidade da água, condições do solo, características da turbina, velocidade do rotor, entre outros (IRENA, 2016) [6].

As fundações podem ser divididas pela profundidade de instalação ou pelo tipo de fixação no fundo do oceano que pode ser fixo ou flutuante. As estruturas fixas são mais utilizadas para profundidades de até 60m pois, a partir disso, as estruturas flutuantes se tornam seus substitutos econômicos. A figura 2.1 mostra os principais tipos de fundações fixas para torres eólicas *offshore*.

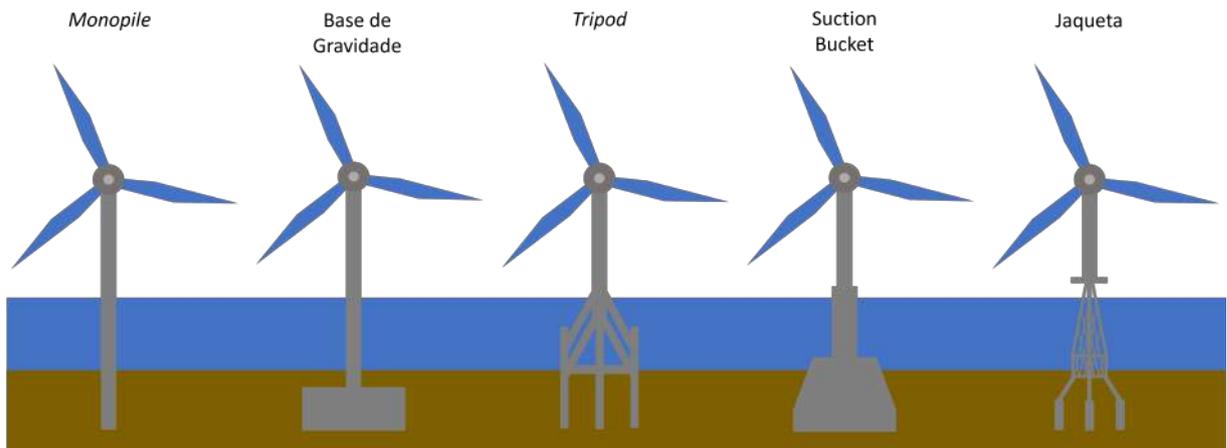


Figura 2.1: Tipos de fundações fixas para torres eólicas *offshore*.

- *Monopile*

Os *monopiles* são estacas tubulares de aço de grande diâmetro, atualmente entre de 3 a 10 m, mas com expectativa de atingirem até 15 m de diâmetro no futuro, e relação entre comprimento e diâmetro na faixa de 3 a 6 (Pisanò, 2019) [7]. Os *monopiles* são normalmente utilizados em águas com até 35 m de profundidade, mas a tendência é permitir que sejam utilizados em água mais profundas (Abadie et al., 2019) [8].

Os projetos de *monopile* evoluem para diâmetros maiores e com espessuras de paredes mais grossas com o objetivo de acompanhar o aumento da massa da turbina, carga dinâmica e rigidez requerida (IRENA, 2016) [6].

Segundo o relatório da NREL (2022) [9] cerca de 64,4% de todas as turbinas eólicas *offshore* em operação em 2021 têm fundação em *monopile*.

O comportamento de turbinas eólicas *offshore* suportadas por *monopiles*, instaladas em solos arenosos e submetidas a carregamentos laterais vem sendo objeto de estudo pelo Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga - LM²C/COPPE/UFRJ há bastante tempo, como pode ser visto em Barra (2020) [10], Gomes (2020) [11], Ferreira et al. (2021) [12], Lopes et al. (2023) [13], Almeida et al. (2023) [14] e Lemos (2023) [15].

- Base de Gravidade

As fundações de base de gravidade são estruturas depositadas no fundo do mar com uma massa suficiente para fornecer a estabilidade necessária contra o impacto das ondas, correntes e cargas provenientes da turbina (IRENA,2016) [6].

- *Tripod*

É uma fundação proveniente da indústria de óleo e gás. Consiste em uma estaca de aço abaixo da turbina com três pernas de aço alocadas no leito marinho (IRENA,2018) [16].

- *Suction Bucket*

A estrutura ancorada bombeia água do balde para reduzir a pressão interna da estrutura. A combinação da pressão com o peso da fundação é capaz de manter a estrutura fixada ao solo (IRENA, 2018) [16].

- Jaqueta

Assim como os *tripods*, a jaqueta é um tipo de estrutura proveniente da indústria de óleo e gás. Baseia-se em uma estrutura treliçada que pode ter 3 ou 4 pernas (IRENA, 2018) [16].

2.1.2 Carregamentos

As torres eólicas *offshore* estão suscetíveis a dois tipos de carregamentos, são eles: vertical e lateral, assim como as estruturas da indústria de óleo e gás. Embora a experiência adquirida com as estruturas da indústria de óleo e gás possa ser utilizada, é importante destacar que o carregamento predominante é diferente entre os dois tipos de estrutura. Enquanto nas estruturas de óleo e gás o carregamento vertical é predominante, nas torres eólicas são as solicitações laterais que predominam.

A figura 2.2 ilustra os principais carregamentos. De acordo com Barra (2020) [10] o carregamento vertical é proveniente do próprio peso da estrutura, enquanto os carregamentos laterais, que tem comportamento cíclico, são oriundos dos ventos, ondas e correntes marinhas (solicitação hidrodinâmica) e rotação das pás (solicitação rotacional).

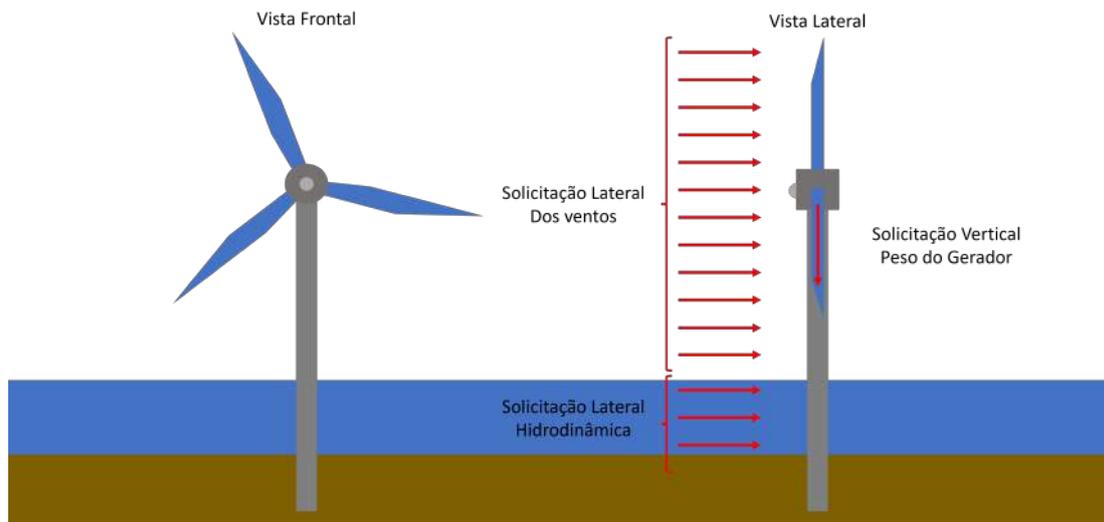


Figura 2.2: Tipos de carregamentos em torres eólicas.

Cada um destes carregamentos apresenta características únicas em termos de magnitude, frequência e número de ciclos aplicados na estrutura (Arany et al, 2015; Nikitas et al, 2016) [17] [18]. Cada carregamento exerce elevadas cargas laterais, gerando grandes momentos de tombamento à nível do solo.

Segundo Kirkwood (2015) [19], ao projetar uma fundação do tipo *monopile*, é necessário que o engenheiro seja capaz de prever a rigidez da fundação em resposta aos carregamentos laterais. Para tal, é possível utilizar diversos métodos, são eles: método de estado limite, método de reação sub-grade (SGRM), curvas p-y, método elástico e método de elementos finitos. Dentre os métodos citados, o método das curvas p-y é o mais utilizado na prática. Essas curvas nada mais são do que gráficos relacionando a força pelo deslocamento. É possível se aprofundar mais sobre o tema de projetos de fundações no guia DNVGL-ST-0126 (2016) [20] das associações não governamentais Det Norske Veritas, da Noruega, e da Germanischer Lloyd, da Alemanha.

2.1.3 Tipos de movimentação

As turbinas eólicas são submetidas a carregamentos laterais cíclicos da ordem de 10^7 ciclos correspondente a uma vida útil em torno de 20 anos. Tais carregamentos podem causar deslocamentos permanentes e alteração da rigidez solo-fundação afetando a vida útil das turbinas eólicas, o que tem motivado uma série de estudos experimentais, tais como LeBlanc et al. (2010) [21], Klinkvort (2012) [22], Kirkwood (2015) [19], Abadie et al (2019) [8].

Segundo Kirkwood (2015) [19], uma estaca cravada verticalmente no solo terá uma distribuição de pressão uniforme através de sua circunferência e, quando um carregamento lateral for aplicado, a pressão se tornará assimétrica de forma a prover uma força de reação a carga aplicada. Em campo, as cargas laterais em uma fundação podem ocorrer em qualquer direção, entretanto, a maioria dos estudos conduzidos sobre carregamentos laterais cíclicos analisam apenas uma ou duas direções de aplicação de força. Esses dois tipos de movimentos são chamados de carregamentos do tipo *one-way* e *two-way*.

Leblanc (2010) [21], utilizou a equação 2.1 para caracterizar o carregamento lateral cíclico em dois tipos.

$$\zeta_c = \frac{M_{min}}{M_{max}} \quad (2.1)$$

Sendo M_{min} e M_{max} as cargas mínimas e máximas em um carregamento cíclico respectivamente.

O valor de $\zeta_c \in [-1;1]$ caracteriza o carregamento cíclico. Caso o valor seja 1, representa um teste estático, caso seja 0, um carregamento do tipo *one-way* e, caso seja -1, o movimentação é do tipo *two-way*.

A movimentação *one-way*, que representa um carregamento em um único sentido, está representada na figura 2.3. É possível notar que a fundação movimenta em um único sentido até achar o valor máximo de carga e volta à posição inicial.

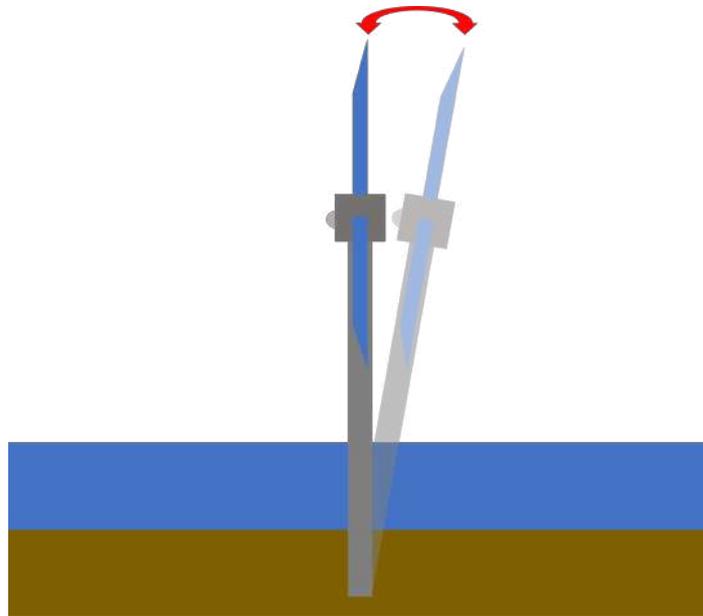


Figura 2.3: Movimentação *One-Way*.

Já a movimentação *two-way*, que representa um carregamento em dois sentidos, está ilustrada na figura 2.4

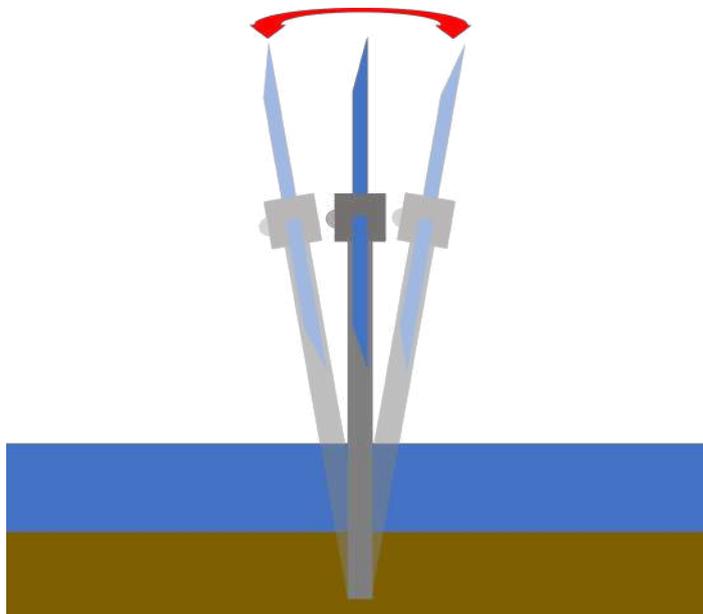


Figura 2.4: Movimentação *Two-Way*.

2.2 Modelagem centrífuga

A modelagem física é uma técnica que permite reproduzir cenários reais, podendo ser em escala reduzida ou real, sob condições controladas. A modelagem física em centrífuga parte do mesmo princípio, entretanto, os modelos são submetidos a campos gravitacionais aumentados. De acordo com Madabhushi (2014) [23], a modelagem centrífuga permite que seja possível investigar problemas ao se utilizar modelos físicos em escala reduzida sob os efeitos de um campo gravitacional aumentado. É uma ferramenta útil e bastante avançada que permite simular as tensões no solo de forma mais adequada que métodos de modelagem física.

2.2.1 Lei das escalas

Pequeno (2013) [24] afirma que o modelo está sujeito a um nível de tensão induzido pelo campo gravitacional proporcionado pelo movimento da centrífuga e o protótipo tem seu nível de tensão definido pelo campo gravitacional terrestre. Madabhushi (2014) [23] apresenta uma lista de leis de escala desenvolvidas para relacionar o comportamento do modelo centrífugo com o comportamento do protótipo.

A equação 2.2 apresenta uma relação entre o raio efetivo de uma centrífuga (r), a velocidade angular (w), a aceleração radial (a), o fator de escala (N) e a aceleração da gravidade (g).

$$a = r.w^2 = N.g \quad (2.2)$$

Dessa forma, a velocidade angular da centrífuga deve ser calculada de modo que o modelo, localizado no raio efetivo, alcance o valor de N desejado. Sendo N o fator de escala. Este fator representa o quanto o modelo é reduzido em relação ao protótipo.

A tabela 2.1 representa as relações de escala entre o modelo e protótipo.

Parâmetro	Lei de Escala Modelo / Protótipo	Unidade
Comprimento	$1/N$	m
Área	$1/N^2$	m^2
Volume	$1/N^3$	m^3
Massa	$1/N^3$	$Nm^{-1}s^2$
Força	$1/N^2$	N
Momento Fletor	$1/N^3$	Nm
Trabalho	$1/N^3$	Nm
Energia	$1/N^3$	J

Tabela 2.1: Lei das escalas.

2.3 Sistemas de controle

Segundo Goodwin (2000) [25], projetar um sistema de controle requer esforços cíclicos que giram em torno da modelagem, projeto, simulação, testagem e implementação.

2.3.1 Controle de malha aberta

Um sistema de malha aberta é aquele em que o sinal de saída gerado não é medido e não tem qualquer influência sobre a ação de controle presente no sistema.

A figura 2.5 ilustra um diagrama de blocos de sistema de malha aberta. Nela é possível notar que a saída da planta não é levada em consideração pelo controlador. Sistemas com controle do tipo malha aberta tem como maior desvantagem o fato de que caso haja algum tipo de interferência, o sistema não conseguirá chegar até o valor desejável. Isso ocorre pois como não há uma realimentação do sinal de saída, cada entrada de referência possui uma saída específica.

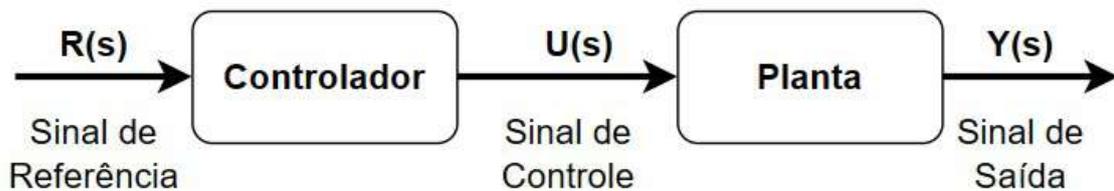


Figura 2.5: Diagrama de blocos de sistema em malha aberta.

2.3.2 Controle de malha fechada

Um sistema de malha fechada é aquele em que o sinal de saída é medido e possui influência sobre a ação de controle do sistema.

A figura 2.6 ilustra um diagrama de blocos de sistema de malha fechada. É possível notar que o sinal de saída é comparado com o sinal de referência. Essa diferença é denominada de sinal de erro e está diretamente atrelada à forma como a ação de controle irá se comportar e ser injetada à planta.

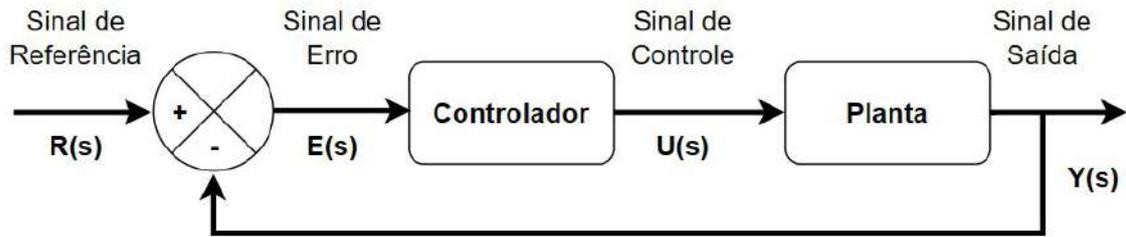


Figura 2.6: Diagrama de blocos de sistema em malha fechada.

2.3.3 Controlador de duas posições ou *ON/OFF*

De acordo com Ogata (2010) [26], em um controlador de duas posições, o atuador do sistema possui apenas posições fixas. Isto é, existem duas ações de controle distintas a depender do sinal do erro existente.

A figura 2.7 representa o diagrama de blocos de um controlador do tipo *ON/OFF* ou controlador de duas posições. A saída do controlador é definida como $U(s)$ e o sinal do erro atuante é $E(s)$. O valor de controle pode ser máximo ou mínimo, a depender do sinal de erro. A equação 2.3 representa o comportamento deste tipo de controlador.

$$\begin{aligned}
 U(s) &= U, & \text{para } E(s) > 0 \\
 &= -U, & \text{para } E(s) < 0
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

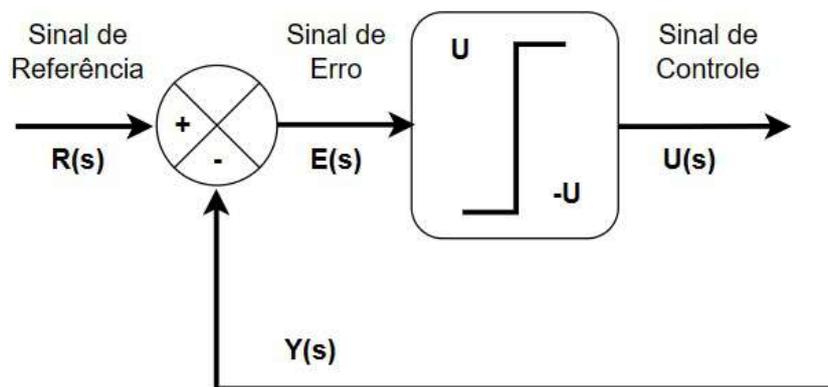


Figura 2.7: Ação de controle de duas posições *ON/OFF*.

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 Materiais e Equipamentos

3.1.1 Amostra de solo arenoso

O solo utilizado para a pesquisa é o solo arenoso pertencente à praia de São Francisco (Niterói, RJ). Esta areia do tipo quartzosa já foi utilizada em outros estudos como Tarazona (2015) [27] e Barra (2020) [10].

Uma característica importante a ser investigada ao se trabalhar com solos arenosos e em ensaios centrífugos é a densidade relativa da amostra. A densidade relativa é a medida da compacidade da areia e, quanto maior sua densidade, maior é a sua rigidez, necessitando uma carga maior para haver alguma deformação na amostra.

Para garantir a repetibilidade da densidade relativa da amostra de areia utilizada nos ensaios centrífugos representada na figura 3.1 é utilizado um pluviador automático. O aparelho pluviador automático, apresentado na figura 3.2, é um maquinário em que a areia é armazenada e despejada em peneiras para garantir um diâmetro médio das partículas e, junto de seu movimento bidirecional, é possível pluviar amostras com densidades relativas específicas. Em Ferreira (2021) [28], é possível obter maiores detalhes quanto à calibração do aparelho para obter uma densidade relativa desejada.

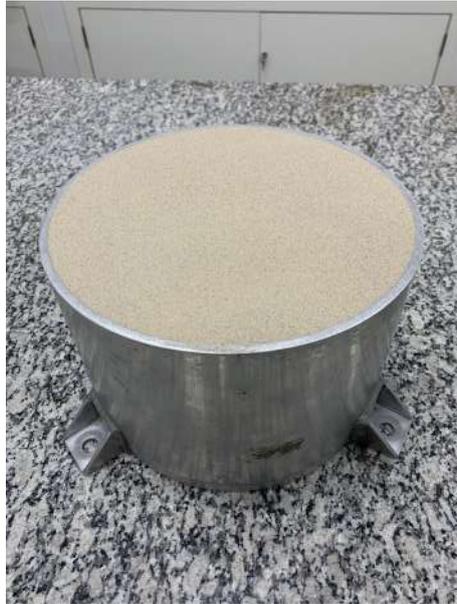


Figura 3.1: Amostra de solo arenoso pluviada.



Figura 3.2: Pluviador automático.

3.1.2 Centrífuga geotécnica

A centrífuga geotécnica utilizada para o trabalho está localizada no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) que está localizado na COPPE/UFRJ. O laboratório possui duas centrífugas geotécnicas: uma de tambor (*drum*) que foi utilizada em trabalhos como Fagundes (2008) [29] e Hotta (2019) [30] e uma de braço (*beam*) que foi utilizada em trabalhos como Guimarães (2014)[31] e Pessin (2017) [32].

A centrífuga de braço do LM²C (figura 3.3) possui um diâmetro de braço de 1,6m e pode alcançar uma velocidade máxima de 648 RPM, o que permite chegar a uma aceleração até 300 vezes maior que a aceleração da gravidade (em um raio efetivo de 0,66m).



Figura 3.3: Centrífuga de Braço do LM²C.

A amostra do solo que foi pluviada na cesta cilíndrica (figura 3.1), assim como os atuadores e modelos, são colocados em uma caixa do tipo balanço (figura 3.4) que é presa à centrífuga. O comportamento da caixa tipo balanço pode ser visto na figura 3.5. Na esquerda, é possível ver o comportamento da caixa em repouso. Já na direita, é possível ver o comportamento da caixa em voo.



Figura 3.4: Caixa balanço com amostra pluviada.

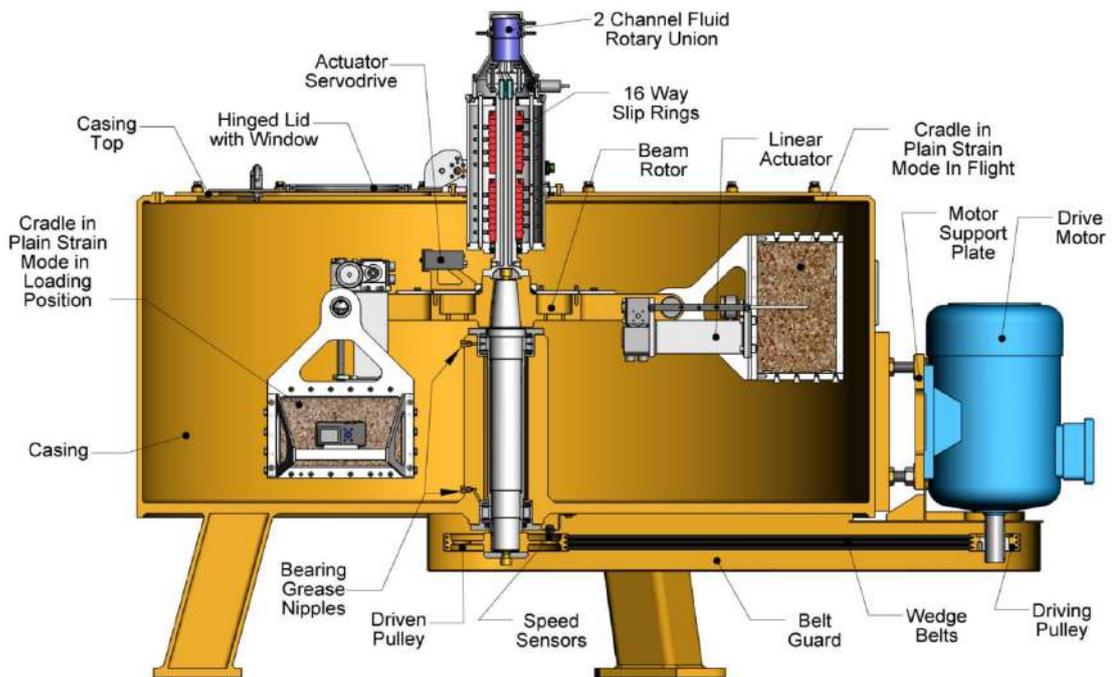


Figura 3.5: Comportamento da caixa retangular tipo balanço em repouso e em voo. (Broadbent Inc, 2011) [1]

3.1.3 Torre eólica *offshore*

O modelo utilizado na modelagem centrífuga foi baseado nas dimensões típicas de uma turbina eólica *offshore* de 3,5MW (megawatts). Essas características foram obtidas em Byrne e Houlsby (2003) [33].

Os carregamentos horizontais e momento fletor atuantes na turbina, conforme abordados no item 2.1.2, foram reproduzidos por um único carregamento horizontal que está a uma altura de 30 metros do leito marinho, conforme Lemos (2023) [15]. O carregamento vertical, típico para turbinas de mesma capacidade de 3,5MW, é de 6 MN.

O processo para converter as dimensões do protótipo simplificado em escala real para o modelo centrífugo com fator de escala igual a 100 ($N = 100$) pode ser visto em Lemos (2023) [15]. A tabela 3.1 ilustra as dimensões de protótipo e modelo utilizados.

Parâmetro	Protótipo Simplificado Escala Real	Protótipo Simplificado Escala 1:2	Modelo $N = 100$
Comprimento do embutimento	20,00 m	10,000 m	100,00 mm
Excentricidade do carregamento	30,00 m	14,740 m	147,40 mm
Diâmetro Externo	4,00 m	1,935 m	19,35 mm
Diâmetro Interno	2,70 m	1,625 m	16,25 mm
Espessura	0,150 m	0,155 m	1,55 mm

Tabela 3.1: Dimensões de protótipo e modelo.

A escala do protótipo simplificado precisou ser reduzida devido às dimensões da centrífuga. A figura 3.6 ilustra as dimensões do protótipo e modelo, à esquerda é possível ver o esquemático de uma turbina eólica *offshore* e à direita um esquemático do protótipo simplificado e do modelo.

3.1.4 Atuadores vertical e horizontal

O servo atuador bidirecional original da centrífuga, mostrado na figura 3.8, pode ser utilizado para cravação e retirada de componentes na direção vertical (eixo Z) e movimentação radial na direção horizontal (eixo X).

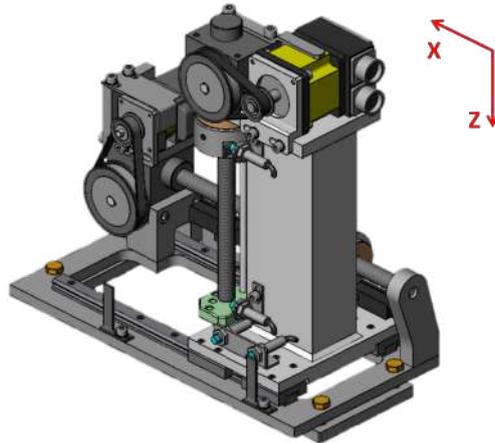


Figura 3.8: Servo atuador bidirecional (Broadbent, 2011)[1].

O atuador bidirecional tem sido usado para cravação do modelo de *monopile* na amostra de solo arenoso, como pode ser visto na figura 3.9. A cravação é feita em baixas velocidades (0,1 m/s) de forma que a compacidade do solo seja o menos afetada possível.

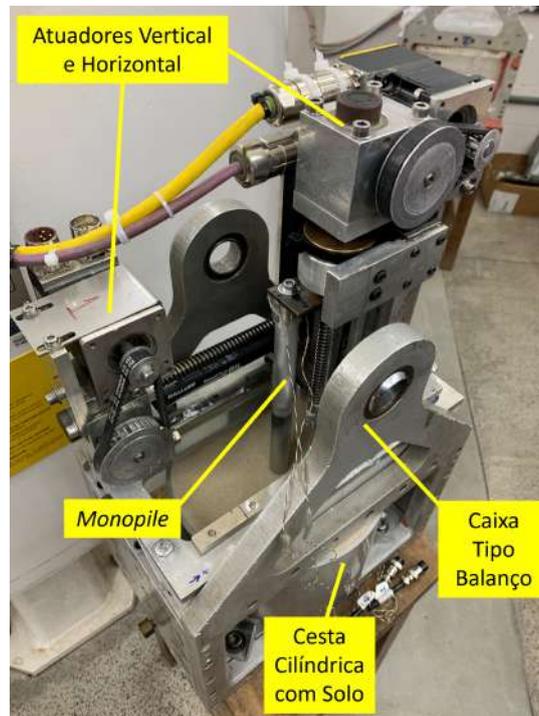


Figura 3.9: Cravação do modelo na amostra de solo.

3.1.5 Atuador cíclico

O carregamento horizontal cíclico, conforme explicado nos itens 2.1.2 e 3.1.3 foi aplicado a partir do uso do cilindro pneumático da série MQM da SMC modelo MQMLBL6H-15D (figura 3.10).



Figura 3.10: Cilindro Pneumático MQMLBL6H-15D.

A escolha desse atuador se deu devido às suas características como: baixo atrito, alta estabilidade, atuação em alta frequência e vida útil longa.

3.1.6 Válvulas solenoides e de regulação de fluxo

Para inverter a direção do carregamento aplicado pelo atuador cíclico, foram utilizadas válvulas solenoides da série VQD da SMC modelo VQD1151-5L-M5 (figura 3.11). Essas válvulas possuem um tempo de resposta de ativação e desativação de 4 ms e 2 ms (milissegundos), respectivamente. As válvulas foram fixadas o mais próximo possível do atuador pneumático de forma com que a frequência de carregamento fosse maximizada.



Figura 3.11: Válvula solenoide VQD1151-5L-M5.

Foram utilizadas válvulas reguladoras de fluxo da SMC, modelo AS1201F, no escape das válvulas solenoides com o objetivo de controlar, de forma manual, a sua frequência de funcionamento (figura 3.12). A figura 3.13 mostra todo o sistema pneumático presente no sistema embarcado.



Figura 3.12: Válvula reguladora de fluxo AS1201F.

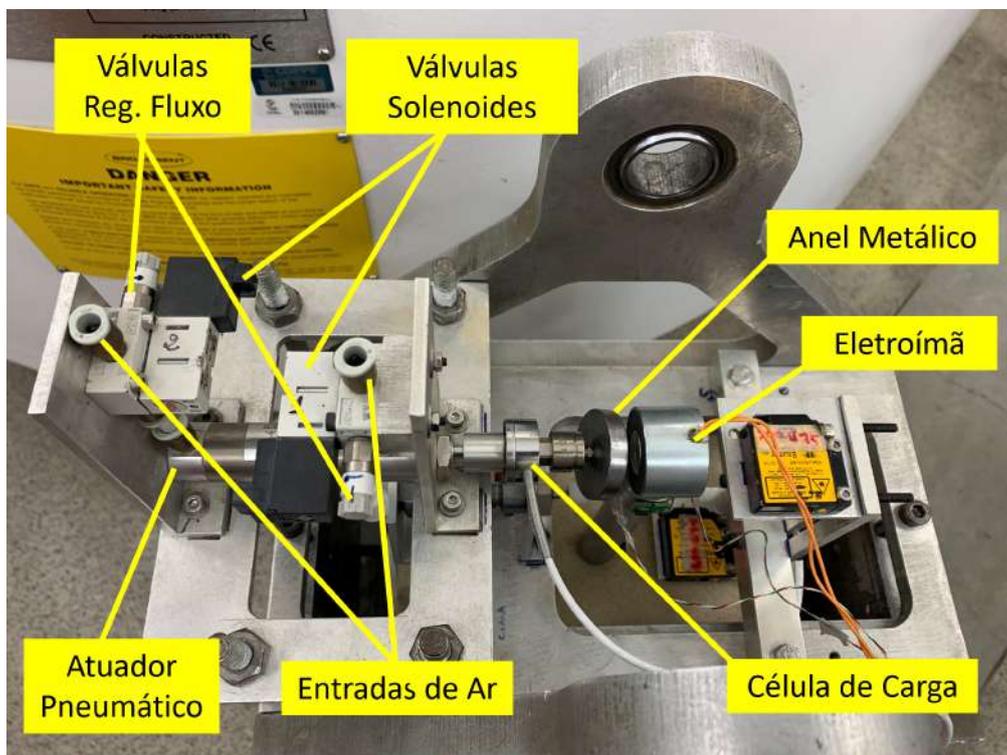


Figura 3.13: Sistema pneumático do ensaio.

3.1.7 Alimentação e regulagem de pressão de ar comprimido

A alimentação e a regulagem de pressão de ar comprimido no sistema pneumático embarcado na centrífuga são feitas através do filtro regulador e lubrificador de ar FRL série AC da SMC modelo AC20A-01E-B (3.14(a)), além disso, é utilizado um transdutor digital de pressão da Norgren (3.14(b)) para verificar a pressão aplicada ao sistema pneumático. Esses componentes se encontram externos à centrífuga para facilitar o seu manuseio.



(a)



(b)

Figura 3.14: Sistema de tratamento e regulagem de ar comprimido e transdutor de pressão.

3.1.8 Célula de carga

O mensurando, força aplicada à fundação, foi medido através de um transdutor de força. A célula de carga utilizada é do modelo LC202-50 da Omega Engineering (figura 3.15). Esta célula de carga é do tipo tensão/compressão, ou seja, permite medir esforços em duas direções e possui uma faixa de medição de 50lb (libras) ou 222N (newtons). A escolha deste componente se deu pelo fato de ser possível medir carregamentos no modelo de fundação em duas direções, possuir uma faixa de trabalho dentro do esperado pelo projeto (em torno de 100N) e por possuir uma exatidão de $\pm 0,25\%$ de linearidade do fundo de escala, histerese e repetibilidade combinadas.

O transdutor foi fixado ao atuador cíclico em uma de suas extremidades, enquanto a outra extremidade foi fixada a um anel metálico que tem por objetivo facilitar o acoplamento entre o atuador e o eletroímã, aprimorando o contato entre os componentes para aplicações de cargas sob o modelo. Essa montagem foi apresentada na figura 3.13.



Figura 3.15: Célula de carga LC202-50.

3.2 Instrumentação

A instrumentação é a área da engenharia que se dedica ao desenvolvimento, construção, implantação, calibração de instrumentos de medição e controle e monitoramento de processos.

3.2.1 Circuito de acionamento

Conforme mostrado nos itens 3.1.5 e 3.1.6, para inverter a direção de carregamento do atuador cíclico, seria necessário ativar e desativar as válvulas solenoides conectadas ao cilindro pneumático. Para tanto, utilizou-se o circuito apresentado na figura 3.16.

O acionamento de uma válvula ocorre a partir do comando de uma porta digital do microcontrolador STM32 que, por sua vez, permite o chaveamento de um transistor do tipo Darlington (TIP122) para alimentar a válvula. A escolha do transistor

do tipo Darlington se deu devido ao seu baixo tempo de resposta e seu bom comportamento em baixas frequências, visto que a frequência máxima do carregamento aplicado sob a fundação é de 10 Hz. A escolha desse valor de frequência de carregamento foi fundamentada por sua correspondência com a frequência de força achada na literatura. Ainda, destaca-se que a frequência escolhida não demonstra variações substanciais nos resultados desejados, sendo utilizada principalmente como forma de otimizar a duração dos ensaios.

Foi utilizado um diodo (1N4007) para proteção dos equipamentos contra possíveis retornos de corrente e, por fim, foi utilizado um optoacoplador (4N33) entre a saída digital do microcontrolador e do transistor com o objetivo de isolar a parte lógica da parte de potência, evitando, assim, possíveis problemas de laços de terra. Além das válvulas solenoides, o circuito de acionamento também é utilizado para ativar e desativar o eletroímã preso ao modelo.

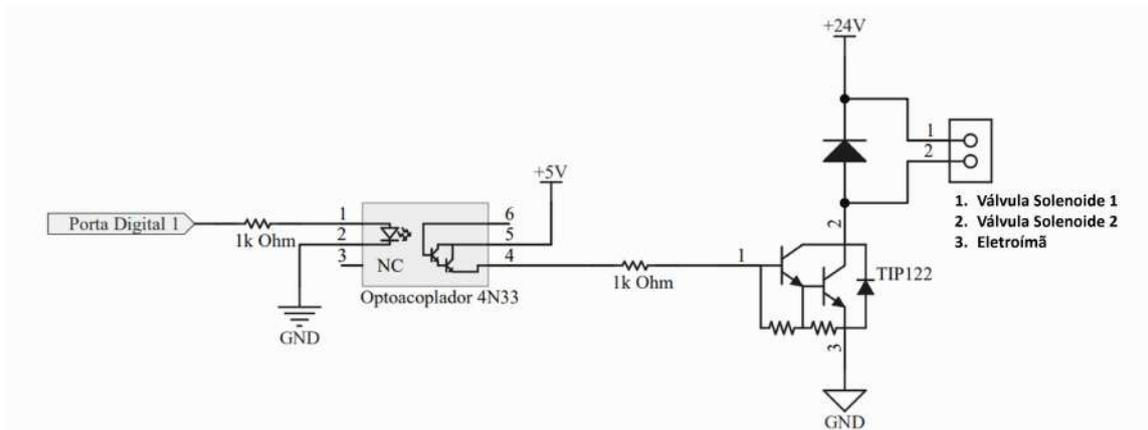


Figura 3.16: Circuito de de acionamento de válvulas.

3.2.2 Circuito de condicionamento da célula de carga

Células de carga têm como função medir força. O funcionamento destes dispositivos se dá através da transferência de força aplicada em seu corpo, o que leva a uma deformação do material. Esta deformação do material origina em uma variação da resistência de *strain gauges*, instalados dentro do corpo do instrumento, que geram uma mudança de tensão ou corrente.

A célula de carga utilizada para o projeto e mostrada na figura 3.15 possui as seguintes informações:

- Excitação: 15 VCC máx;
- Capacidade de operação: 0-50lb ou 0-222N;
- Sensibilidade: 2mV/V;
- Exatidão: $\pm 0,25\%$ linearidade de fundo de escala, histerese e repetibilidade combinada;
- Intervalo de Temperatura Operacional: -54 a 121°C;
- Intervalo Compensado de Temperatura: 16 a 71°C;
- Resistência de Entrada: mínimo 360 Ω ;
- Resistência de Saída: 350 \pm 10 Ω .

Após a análise de suas principais especificações, foi possível constatar que não seria necessário utilizar um circuito de compensação de temperatura, visto que a temperatura presente durante os ensaios e calibrações da célula de carga estão dentro da faixa de compensação do instrumento.

O sinal da célula de carga foi dividido entre o sistema de aquisição de dados, responsável pelo *datalogger*, e o sistema de automação, controlado pelo microcontrolador e responsável pelo sistema de ciclagem. A figura 3.17 apresenta um diagrama de blocos com o caminho do sinal da célula de carga.

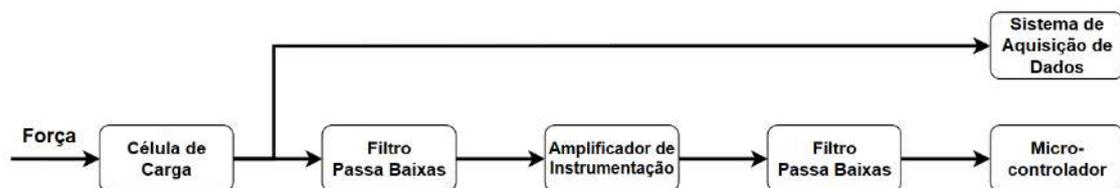


Figura 3.17: Diagrama de blocos do sinal da célula de carga.

Esta seção é focada no caminho do sinal da célula de carga até o microcontrolador, onde se tornou necessário desenvolver um circuito de condicionamento de sinal. A figura 3.18 mostra o circuito final utilizado para o condicionamento de sinal do transdutor de força aplicado no projeto.

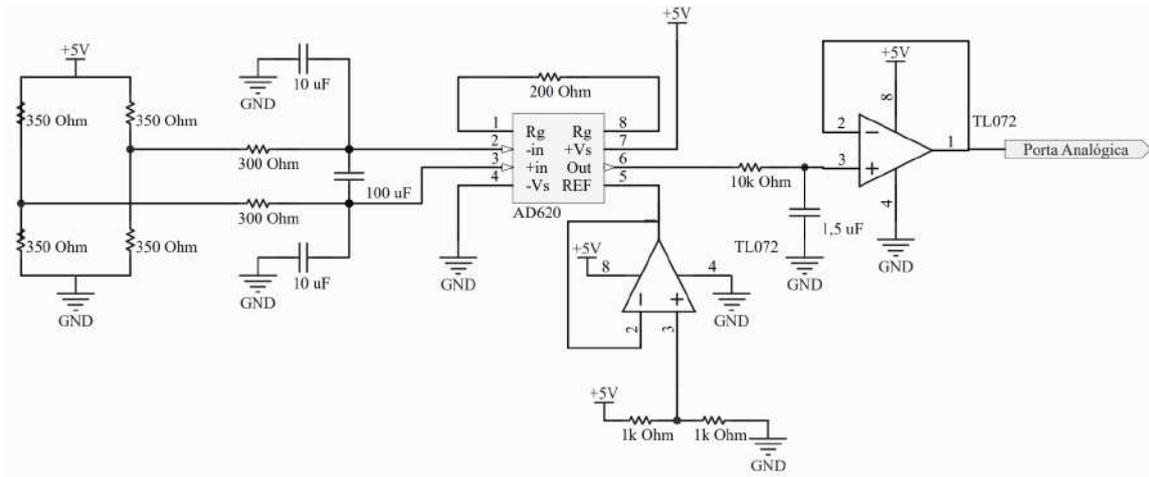


Figura 3.18: Circuito de condicionamento da célula de carga.

A figura 3.19 representa um diagrama de blocos com objetivo de descrever o circuito utilizado para medição de força aplicada ao *monopile*. O diagrama mostra o caminho entre o mensurando e o conversor analógico digital do microcontrolador e todas as faixas de entrada e saída de cada etapa.

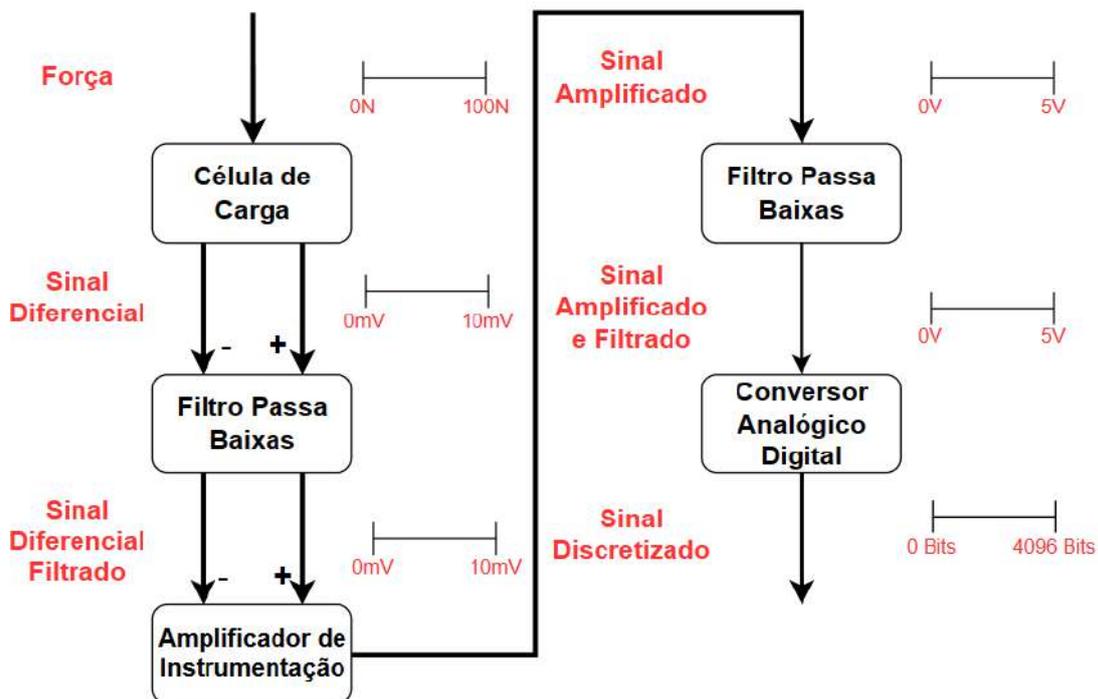


Figura 3.19: Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.

O mensurando, força aplicada à fundação, pode chegar a até 100N (em escala de modelo) em ambos os sentidos (tração e compressão) e é medido pela célula de carga. Conforme citado anteriormente, a sensibilidade do transdutor é de 2mV/V, então, ao ser alimentado por uma fonte de 5V, o fundo de escala será de 10mV caso

toda faixa do transdutor seja utilizada. O sinal diferencial da célula de carga passa por um filtro passa baixas de frequência de corte de 60Hz para filtrar as oscilações provenientes da rede elétrica. A equação 3.1 foi utilizada para calcular os parâmetros do filtro.

Após passar pelo primeiro processo de filtragem, torna-se necessário aplicar uma amplificação ao sinal para certificar que ele ocupe a maior parte possível da faixa de leitura do conversor analógico digital do microcontrolador, a qual varia de 0 a 5V, sem que haja saturação. Para aplicar a amplificação, foi utilizado o amplificador de instrumentação AD620. Sua escolha se deu devido ao seu alto valor de CMRR (rejeição de modo comum) e alto *slew-rate*. A equação de ganho do amplificador é mostrada na equação 3.2.

Em seguida do processo de amplificação, é aplicada uma segunda etapa de filtragem com uma frequência de corte de 15 Hz. A escolha desta frequência de corte foi baseada no fato do sistema de ciclagem operar a uma frequência aproximada de 10 Hz. Além disso, em filtros passa baixas, a atenuação do sinal começa a se tornar significativa em frequências inferiores à frequência nominal de operação. Consequentemente, uma frequência de corte de 15 Hz foi selecionada para garantir que o filtro atenuasse efetivamente qualquer componente de frequência indesejada acima da faixa de interesse do sistema de ciclagem. A equação 3.1 foi reutilizada para calcular os valores do segundo filtro RC.

Por último, o sinal é amostrado pelo conversor analógico digital do microcontrolador STM32. A escolha desse microcontrolador se deu por possuir um conversor analógico digital de 12 bits, ou seja, sua faixa de leitura, de 0 a 5V, é dividida em 4096 partições, sendo, então, possível ler variações de força de até 0,02N da faixa de força utilizada.

É importante destacar que foram empregados amplificadores operacionais com a função de *buffers* em duas instâncias específicas: na entrada de referência do CI AD620, visando posicionar o valor de força zero no centro da faixa de operação; e após o segundo filtro passa baixas antes de chegar ao conversor analógico digital. A razão para a utilização desses *buffers* é evitar qualquer casamento de impedâncias.

$$F_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3.1)$$

$$R_g = \frac{49,4k\Omega}{G - 1} \quad (3.2)$$

Simulações do circuito foram realizadas no *software LTSpice* com objetivo de testar o funcionamento do circuito de amplificação, dos filtros e definição do ganho de amplificação.

A saída da célula de carga foi modelada pela equação 3.3:

$$V_C = \frac{S \times VCC}{C_N} \times F + O_I + \frac{VCC}{2} \quad (3.3)$$

Sendo:

- V_C : Tensão de saída da célula de carga;
- S : Sensibilidade da célula de carga;
- VCC : Tensão de alimentação da célula de carga;
- C_N : Carga Nominal;
- F : Força aplicada;
- O_I : *Offset* do *input* do amplificador de instrumentação.

É importante enfatizar que o amplificador de instrumentação rejeitará a contribuição da terceira parcela do somatório da tensão de saída de célula de carga. Esta ação ocorre pelo fato de que esse valor representar a componente de modo comum entre os terminais diferenciais do transdutor. A equação 3.4 ilustra a saída do amplificador de instrumentação.

$$V_{out} = (V_C - \frac{VCC}{2}) \times A_V + O_O + V_{REF} \quad (3.4)$$

Sendo:

- V_{out} : Saída de tensão do amplificador de instrumentação;
- A_V : Ganho do amplificador;
- O_O : *Offset* do *output* do amplificador de instrumentação;
- V_{REF} : Entrada de tensão de referência.

O *datasheet* do fabricante do amplificador de instrumentação (Analog Devices [34]) foi utilizado para obter os valores de *offset* das entradas de amplificação e de saída além dos valores máximos e mínimos de saída conforme alimentação do CI. O circuito utilizado para simulação pode ser vista na figura 3.20.

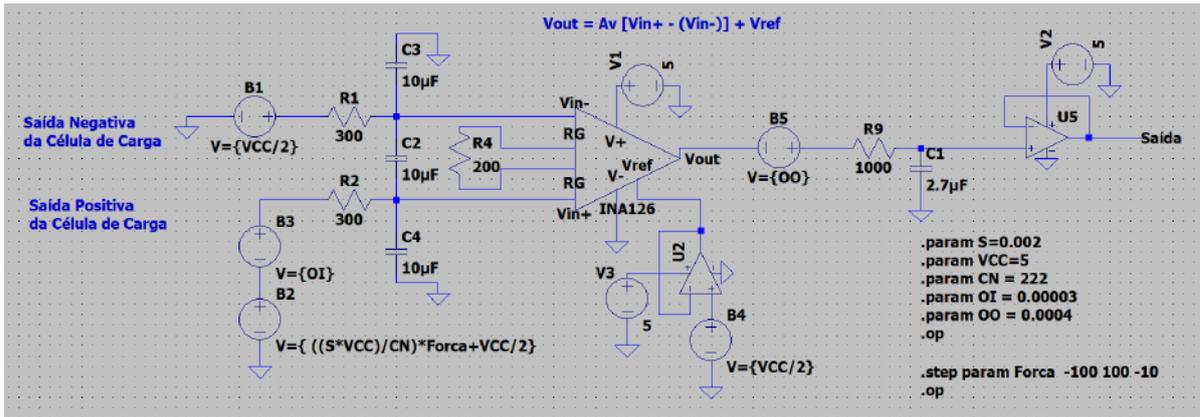


Figura 3.20: Circuito usado para simulação.

Utilizando a equação 3.2, foi obtido um ganho de aproximadamente 250. Este ganho foi estabelecido para o sinal condicionado preencher o máximo possível da faixa do conversor analógico digital do STM32 sem que haja uma saturação do sinal e que o resistor de ganho possa ser de um valor comercial. O resultado da simulação pode ser visto na figura 3.21.

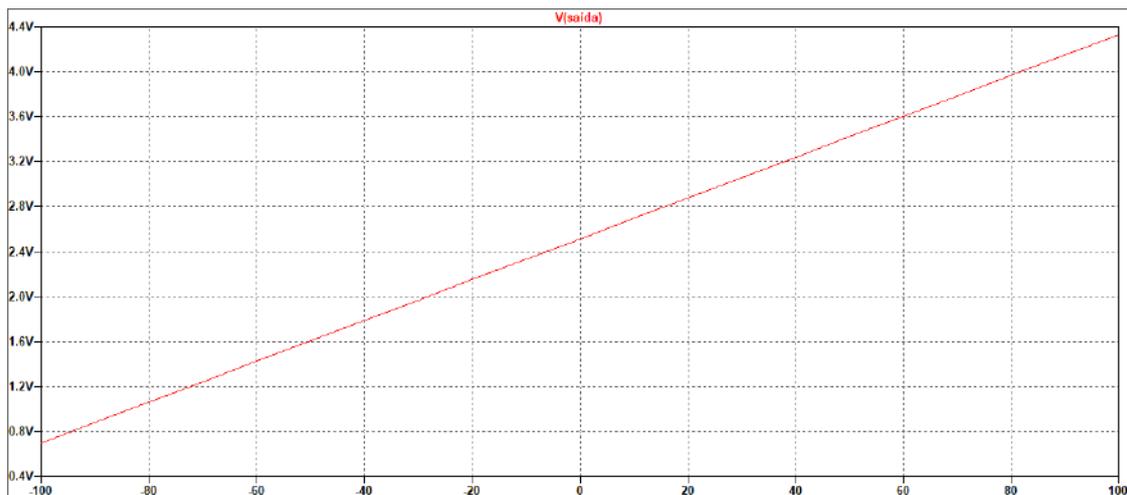


Figura 3.21: Resultado da simulação - Tensão (V) x Força (N).

Ao analisar o gráfico da figura 3.21, é possível notar que o valor de zero Newton está situado no meio da escala de tensão, permitindo que tanto o movimento de tração quanto o de compressão tenham o mesmo tamanho de faixa de operação.

3.2.3 Placa de circuito e caixa de automação

Com a elaboração dos circuitos mostrados nos itens 3.2.1 e 3.2.2, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma placa de circuitos com os circuitos de acionamento e condicionamento de sinal integrados.

Uma estrutura para acomodar a eletrônica do projeto foi concebida por meio do *software Fusion 360* e fabricada via manufatura aditiva. Para a montagem dos circuitos, utilizou-se uma placa de circuito ilhada. O conjunto composto pela placa de circuitos e caixa de armazenamento foi denominada como caixa de automação e posteriormente foi embarcada à centrífuga de braço. A figuras 3.22(a) e 3.22(b) ilustram a placa de circuito fabricada e a estrutura para armazenamento e fixação dos circuitos.



(a)



(b)

Figura 3.22: Placa de circuito e caixa de automação do projeto.

3.2.4 Calibração da célula de carga

Uma calibração estática de um equipamento é o processo que descreve a resposta do instrumento a entradas de frequência zero. Pode ser definida também como uma relação entre as entradas contínuas no instrumento e suas saídas correspondentes. As calibrações podem ser representadas através de curvas, equações ou tabelas.

A calibração do transdutor de força do projeto se deu a partir de carregamentos e descarregamentos com massas de aproximadamente 1 kg durante períodos de 1 minuto entre mudanças de carga para estabilização do sinal. Os dados salvos foram tratados para obtenção de uma curva de calibração para ser usada no sistema de aquisição de dados. A figura 3.23 mostra as massas utilizadas no processo de calibração. Já a tabela 3.2 representa as massas de cada peso utilizado.



Figura 3.23: Massas utilizadas no processo de calibração.

	Massa (kg)	Valor Total (kg)
Massa 0	0,149	0,149
Massa 1	0,990	1,139
Massa 2	0,988	2,125
Massa 3	1,002	3,127
Massa 4	0,990	4,113
Massa 5	0,980	5,093
Massa 6	0,990	6,083
Massa 7	1,022	7,105
Massa 8	0,993	8,098

Tabela 3.2: Valor das massas para calibração.

É importante destacar que o valor de massa zero de 0,149 kg é referente à estrutura acoplada à célula de carga para apoio dos pesos.

Como o sistema tem por objetivo aplicar carregamentos do tipo *one-way* e *two-way*, foram feitas duas calibrações, uma com a célula de carga em compressão e outra em tração. Por fim, as constantes de calibração entre os dois métodos serão comparadas.

Calibração por compressão

Para ser possível aplicar carregamentos e descarregamentos por meio da compressão, tornou-se necessário desenvolver um sistema para fazer calibração do transdutor. O sistema desenvolvido é apresentado na figura 3.24.

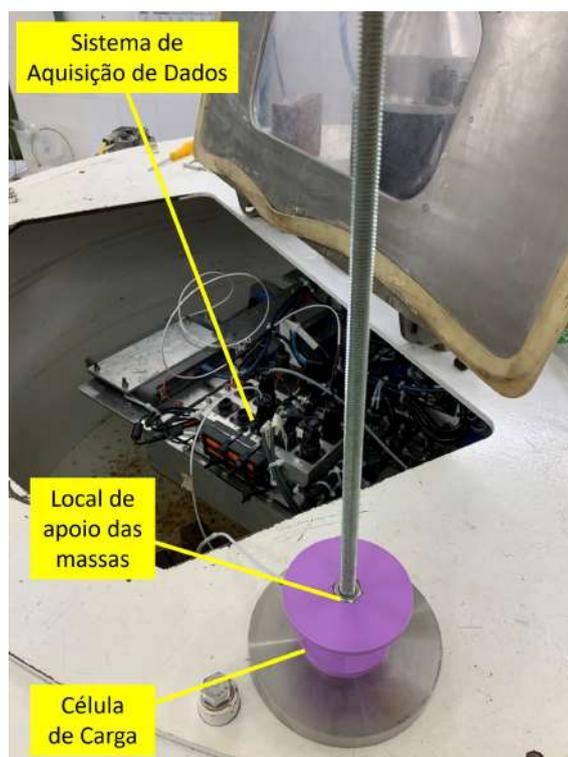


Figura 3.24: Sistema de calibração por compressão.

O gráfico correspondente aos 2 ciclos de carregamento e descarregamento pode ser visto na figura 3.25. É válido ressaltar que os formatos do sinal anormais são oriundos da vibração da estrutura de calibração conforme o carregamento e descarregamento de massas. Esses valores não foram levados em conta para a média do valor de saída da célula de carga.



Figura 3.25: Ciclos de carregamento e descarregamento de compressão.

Os valores médios de cada etapa de carregamento e descarregamento foram utilizados para adquirir a curva de calibração do transdutor apresentado na figura 3.26.

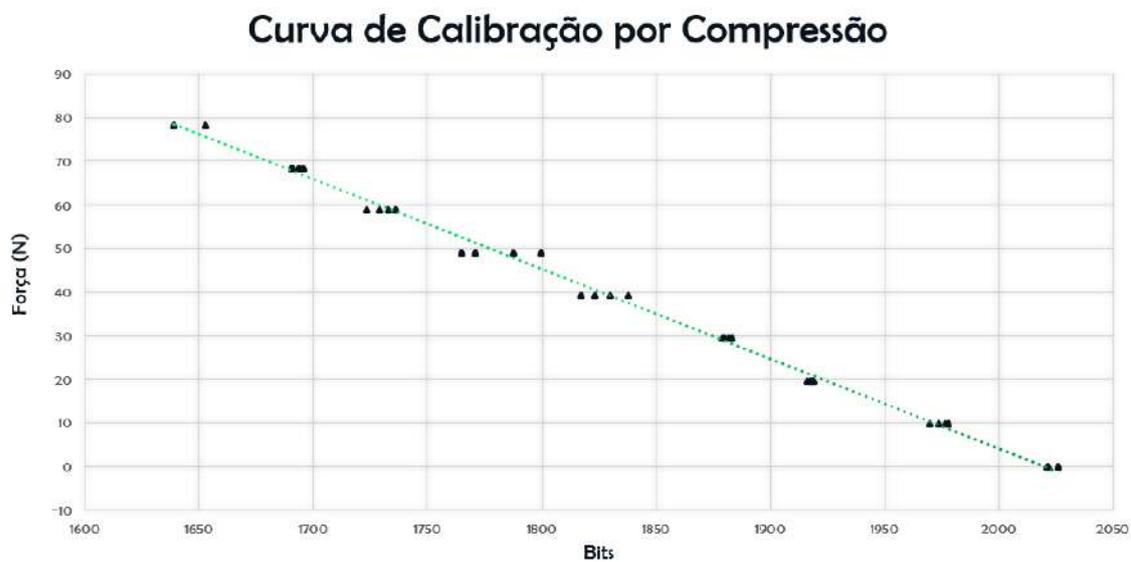


Figura 3.26: Curva de calibração de compressão.

Os coeficientes obtidos através da calibração por compressão foram:

Coeficiente Angular (a): -0,206

Coeficiente Linear (b): 416,486

R Quadrático (R^2): 0,995

Calibração por tração

Assim como para compressão, foi necessário desenvolver um método de calibração para tração da célula de carga. O sistema aplicado é mostrado na figura 3.27.

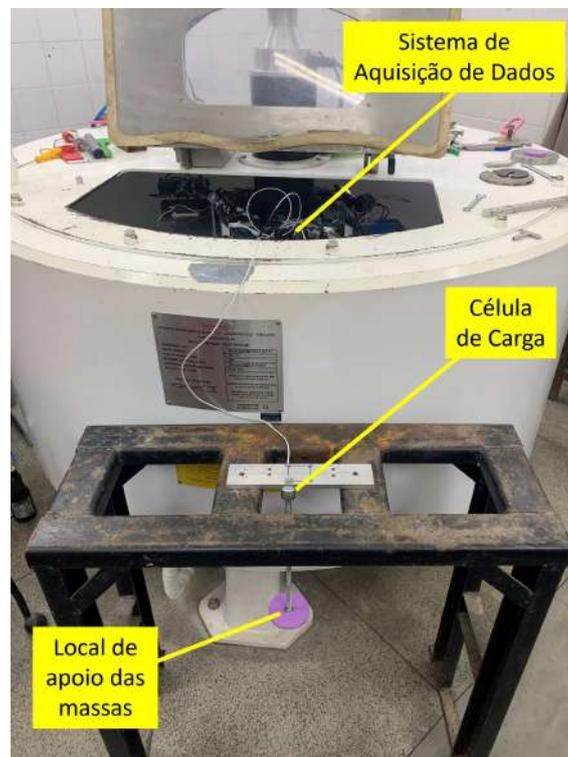


Figura 3.27: Sistema de calibração por tração.

O gráfico apresentado na figura 3.28 apresenta os dois ciclos de carregamento e descarregamento no sistema de calibração por tração. Da mesma forma que na figura 3.25, os formatos anormais do gráfico representam uma vibração na estrutura ao alocar os pesos.

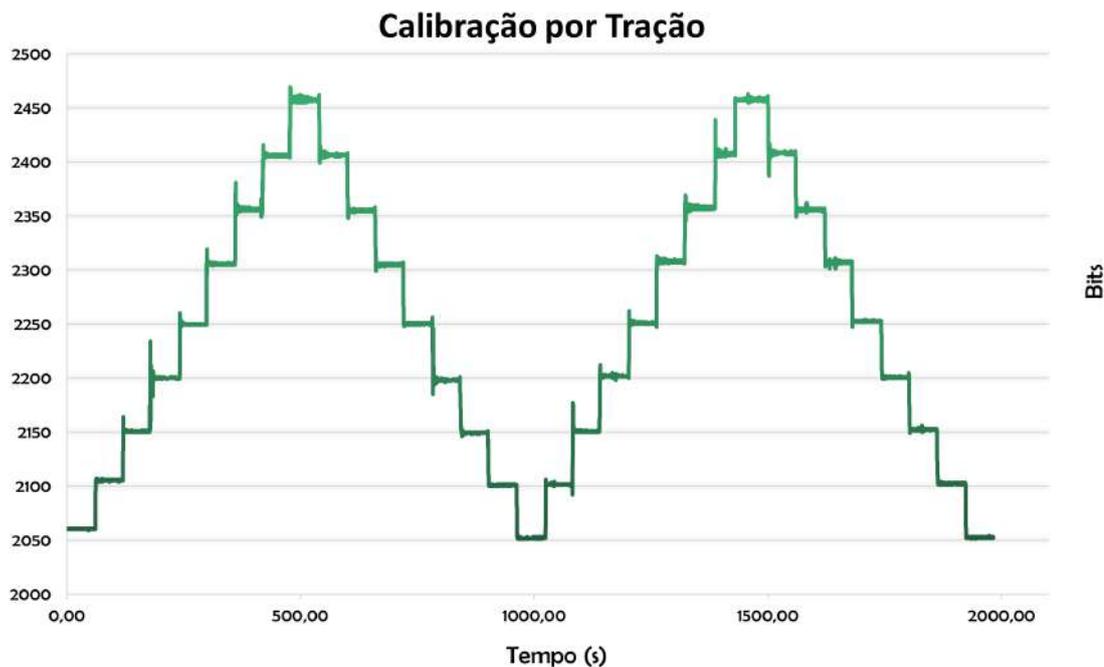


Figura 3.28: Ciclos de carregamento e descarregamento de tração.

Os valores médios de cada etapa de carregamento e descarregamento foram usados para calcular a curva de calibração da célula de carga apresentado na figura 3.29.



Figura 3.29: Curva de calibração de tração.

Os coeficientes obtidos através da calibração por tração foram:

Coeficiente Angular (a): 0,193

Coeficiente Linear (b): -395,443

R Quadrático (R^2): 0,999

Comparação entre métodos

A tabela 3.3 faz uma comparação entre os métodos de calibração utilizados.

	Compressão	Tração	Variação
Coefficiente Angular (a)	-0,206	0,193	6,498%
Coefficiente Linear (b)	416,486	-395,443	5,321%
R Quadrático (R^2)	0,995	0,999	0,392%

Tabela 3.3: Comparação entre métodos de calibração.

Embora a movimentação do tipo *one-way* seja o principal foco de estudo de movimentação neste trabalho, devido à sua característica mais desfavorável para a fundação (por demandar maior rigidez do modelo) e por utilizar especialmente a força de compressão, é primordial que o sistema seja capaz de operar de forma eficiente para ambas as formas de movimentação. Dessa forma, a curva de calibração utilizada é a média simples entre os coeficientes dos dois métodos de calibração.

$$y = 0,199x + 405,964$$

3.2.5 Softwares

Os ensaios centrífugos para o projeto contaram com a utilização de dois *softwares*. Um para controlar o sistema aquisição de dados do sinal da célula de carga e outro para operar o sistema de controle aplicado pelo microcontrolador.

LogLab

O *software LogLab*, vide figura 3.30, é responsável por fazer a conexão entre o sistema de aquisição de dados e o computador supervisor utilizado no projeto. O sistema conta com um conversor analógico digital de 12 *bits* e possui taxa de aquisição de até 1 kHz. Vale ressaltar que os dados do projeto foram amostrados à uma taxa de 1 kHz para evitar o efeito de *aliasing* no sinal amostrado.

TEO Sys

O *software TEO Sys* é um *software* próprio, desenvolvido para o sistema de automação do projeto, com o objetivo de fazer a operação do microcontrolador através de um computador supervisor. O programa foi desenvolvido através da linguagem de programação VB.Net no *software Visual Studio* da *Microsoft*. A figura 3.31 apresenta o programa e foi dividida e numerada em 9 blocos para facilitar a explicação sobre todas as suas funcionalidades.

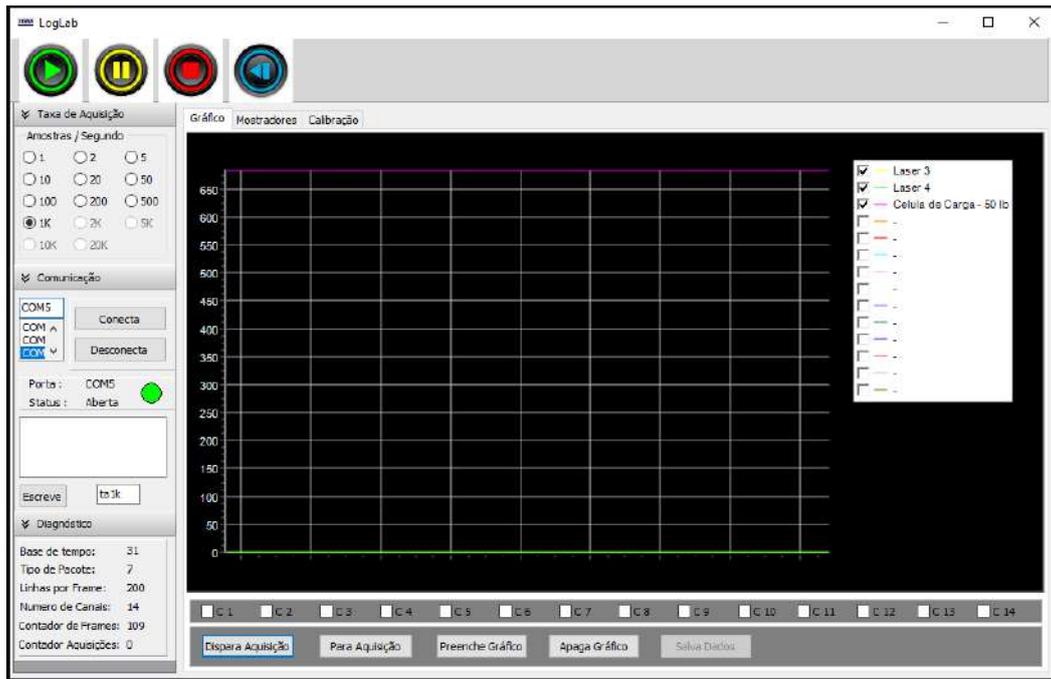


Figura 3.30: *Software* de aquisição de dados.

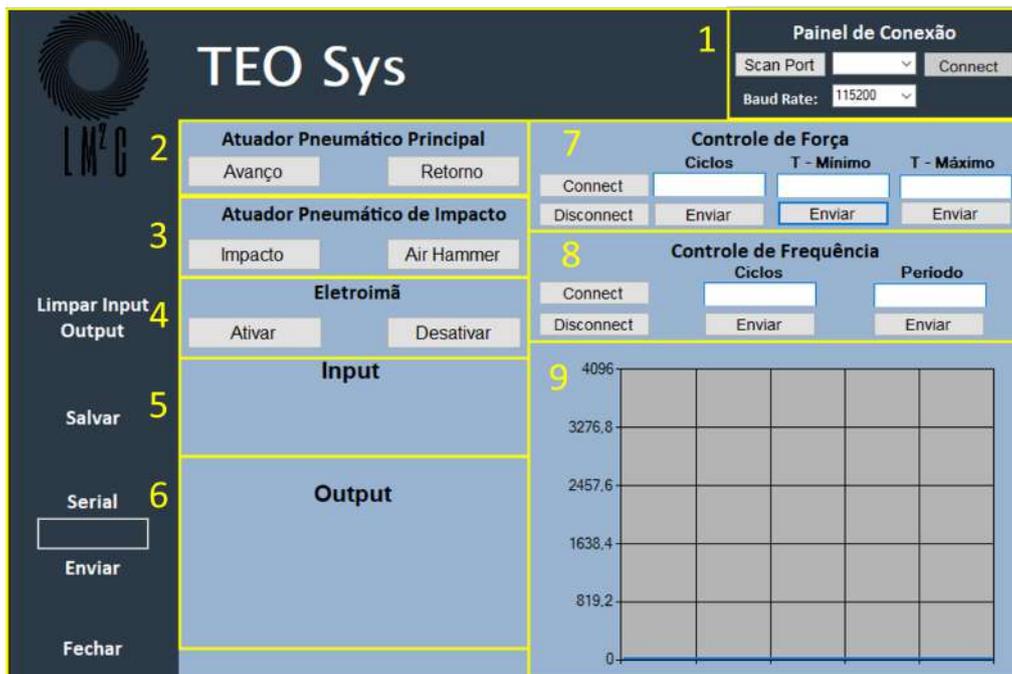


Figura 3.31: *Software TEO Sys* próprio para automação.

- Bloco 1 - Denominado como painel de conexão, é responsável por fazer a conexão entre o computador e a porta COM em que o microcontrolador se encontra.
- Bloco 2 - Tem por função controlar de forma manual o avanço e retorno do atuador pneumático principal do projeto. O acionamento se dá através do

circuito apresentado na seção 3.2.1. É utilizado para fazer o acoplamento entre o atuador e o modelo.

- Bloco 3 - É responsável pelo acionamento de válvulas solenoides utilizadas para movimentação de um segundo atuador pneumático e um martelo de ar. Estas funções e suas aplicações podem ser vistas em (Lemos,2023) [15] e (Barboza, 2023) [35].
- Bloco 4 - Tem por função ativar e desativar o eletroímã responsável pelo acoplamento entre o modelo e o sistema pneumático de ciclagem. Este acionamento também é feito através do circuito mostrado na seção 3.2.1.
- Bloco 5 - Todos os *inputs* aplicados no sistema, como acionamentos, são mostrados nesta área como espécie de linha do tempo do uso do programa.
- Bloco 6 - Todas as saídas do sistema são apresentadas neste bloco, como os valores lidos pela célula de carga.
- Bloco 7 - É neste bloco em específico, que o usuário ativa o sistema denominado de controle de força, que opera como um sistema de controle em malha fechada. O usuário precisa digitar três valores, a quantidade de ciclos a ser feita e os valores de *setpoints* de força máximo e mínimo de carregamento. Esse modo permite com que os movimentações do tipo *one-way* e *two-way* sejam cumpridas.
- Bloco 8 - É neste bloco em específico, que o usuário ativa o sistema denominado de controle de frequência, que opera como um sistema de controle em malha aberta. O usuário precisa digitar apenas a quantidade de ciclos a ser feita e o período entre ciclagem. Nesse modo de operação só é possível aplicar o tipo de movimentação *two-way*, visto que o valor de força lido pela célula de carga só é utilizado para gravação de dados e não para realimentar o sistema.
- Bloco 9 - Neste bloco é mostrado um gráfico dos valores lidos pela célula de carga.

3.3 Procedimentos e funcionamento do sistema

3.3.1 Procedimentos do ensaio centrífugo

Essa seção tem como objetivo explicar todos os procedimentos do ensaio e seu funcionamento. A figura 3.32 ilustra um fluxograma com todo o passo a passo do ensaio.

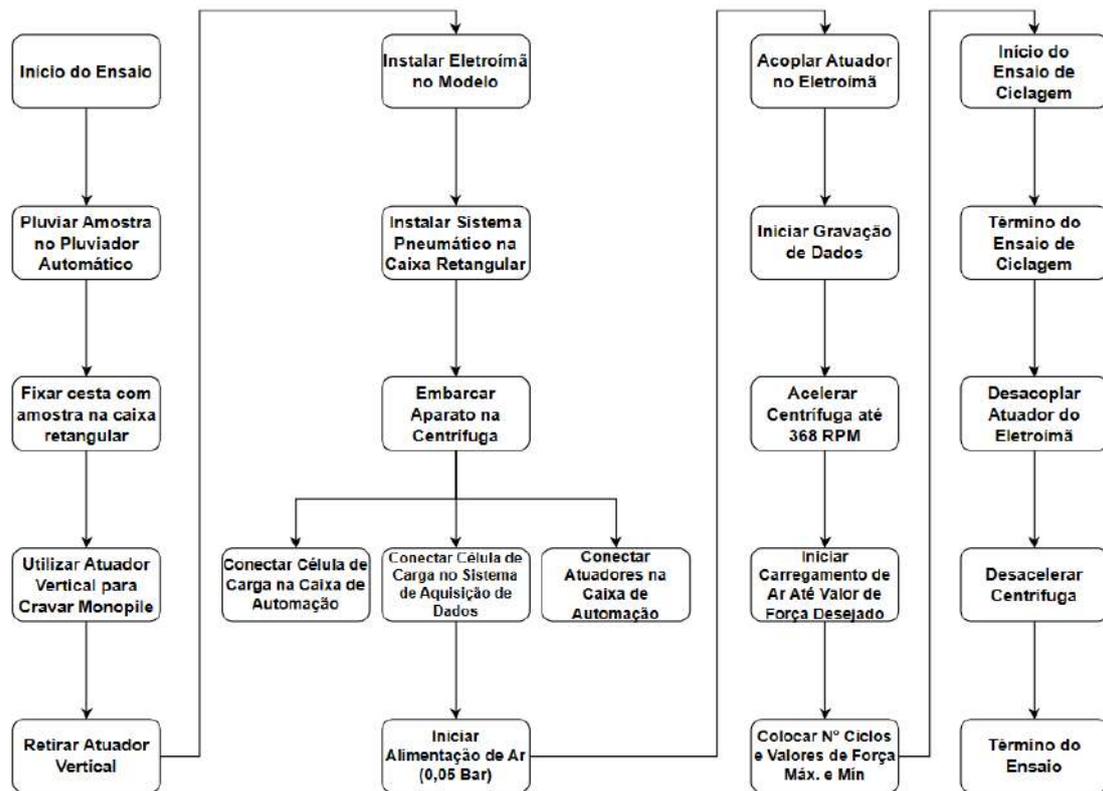


Figura 3.32: Fluxograma de procedimentos do ensaio.

O ensaio se inicia com a pluviação da amostra no pluviador automático e a fixação da cesta com solo arenoso na caixa retangular (de balanço). Em seguida, o atuador vertical é utilizado para cravar o *monopile* com um embutimento de 100 mm e, ao finalizar, é retirado para que o eletroímã possa ser instalado. Para terminar o processo de montagem, o sistema pneumático (contendo atuador pneumático, válvulas solenoides e válvulas reguladoras de fluxo) é instalado na caixa de ensaios.

Em seguida, o sistema montado é embarcado na centrífuga, onde os atuadores e célula de carga são conectados na caixa de automação e no sistema de aquisição de dados. É adicionado um pouco de pressão no sistema (em torno de 0,05 bar) ao sistema, através do sistema de alimentação de ar comprimido, com objetivo de acoplar o atuador pneumático ao eletrímã de forma suave para não perturbar a amostra de solo. Este procedimento é realizado através do *software TEO Sys*.

Com o acoplamento finalizado, o ensaio está pronto para ocorrer. Antes de iniciar a aceleração da centrífuga a 368 RPM (campo gravitacional de 100 G), o sistema de aquisição de dados é ligado com uma taxa de aquisição de 1 kHz. Após a centrífuga atingir a velocidade desejada, o usuário irá inserir a quantidade de ciclos necessário e os valores de *setpoints* máximo e mínimo de força para que o sistema denominado controle de força possa operar.

Por fim, ao término do número de ciclos de carregamento do sistema inseridas pelo usuário, inicia-se o término do ensaio centrífugo. Os dados capturados pelo sistema de aquisição são salvos e é feito o desacoplamento entre o atuador pneumático e o modelo. Com o desacoplamento realizado, a centrífuga é desacelerada finalizando, então, o ensaio centrífugo.

As figuras 3.33 e 3.34 representam o sistema embarcado em repouso antes de ligar a centrífuga e o sistema em voo durante o ensaio de ciclagem, respectivamente.

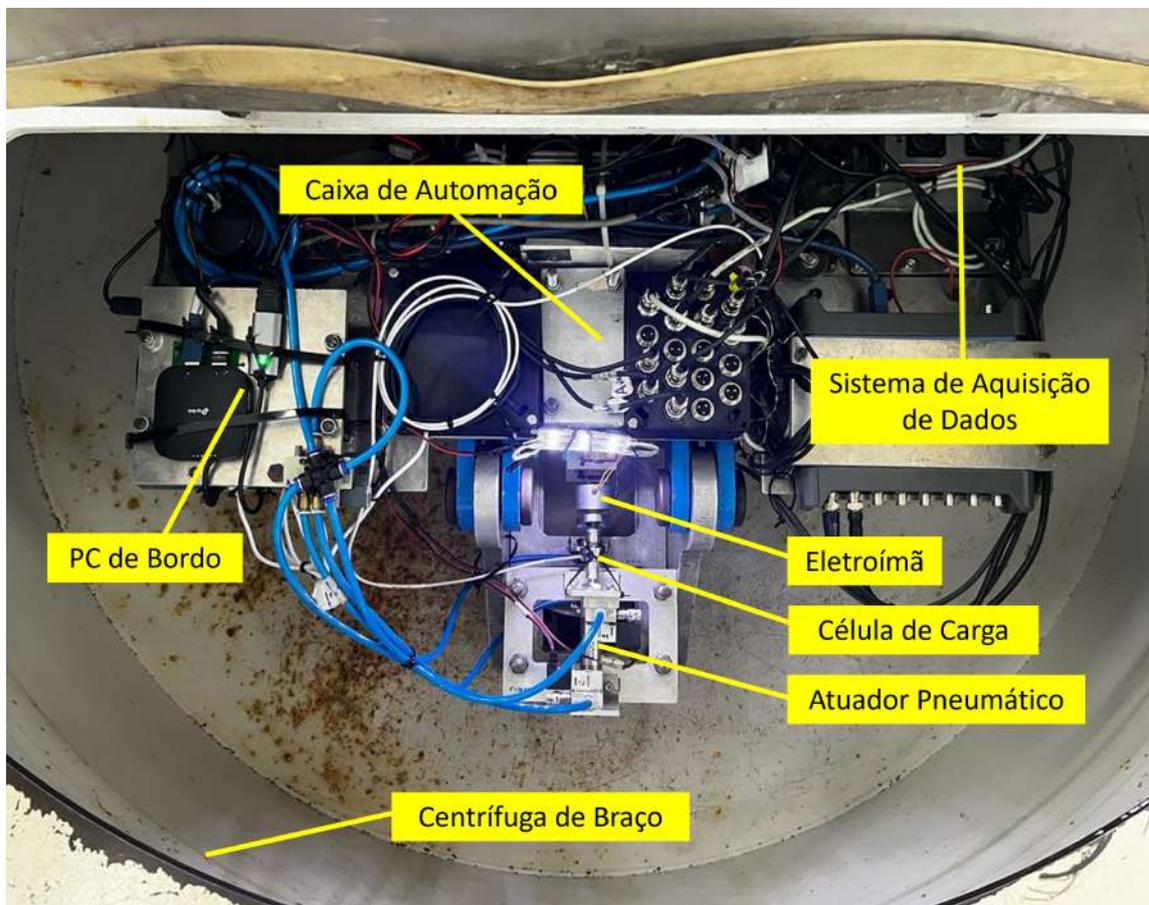


Figura 3.33: Vista do sistema embarcado em repouso.

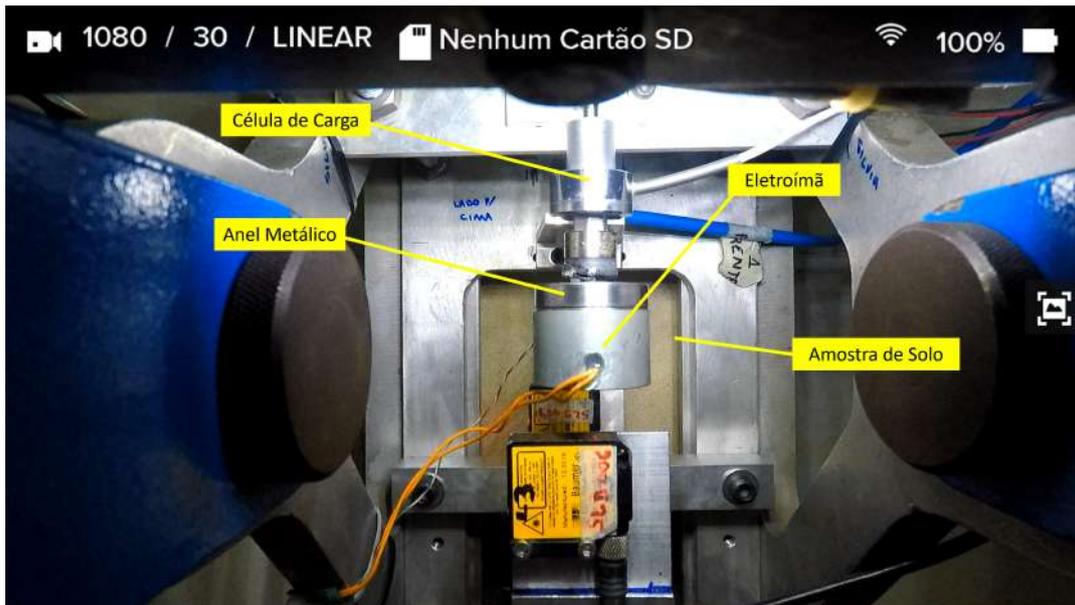


Figura 3.34: Vista do sistema embarcado em voo.

3.3.2 Sistemas de controle

Conforme apresentado na figura 3.31, durante o projeto, foram desenvolvidos duas formas de controlar os carregamentos sobre o modelo, uma em malha aberta (controle de frequência) e uma em malha fechada (controle de força).

Inicialmente, o controle de frequência consistia em apenas controlar a frequência de acionamento das válvulas solenoides de avanço e retorno do atuador. Foi suposto que, com uma pressão constante, a força de carregamento também se tornaria constante. Sob esse cenário, tornou-se desnecessário a implementação da realimentação do sinal da célula de carga para o controlador do tipo relé (duas posições).

Entretanto, essa suposição não se tornou válida, uma vez que, apesar da pressão ser mantida de forma constante, deixou-se de considerar as não linearidades presentes em um atuador pneumático. Esta problemática se deve pelo motivo de as câmaras de avanço e de retorno não possuírem as mesmas dimensões, resultando em variações na quantidade de ar em cada uma. Por fim, o resultado foi que as forças correspondentes a cada ação (avanço e retorno) divergiram entre si.

Devido a esses problemas relatados, tornou-se necessário o desenvolvimento de um segundo modelo de controle que fosse possível controlar a força, além da frequência, de carregamento e que fosse habilitado para aplicar carregamentos do tipo *one-way* e *two-way*. Concebeu-se então o sistema de controle de força. Esta estratégia de controle se baseou na utilização de controladores do tipo duas ações para controlar a força de carregamento e a frequência seria regulada de forma manual através das válvulas reguladoras de fluxo. A figura 3.35 apresenta um diagrama de blocos do sistema de controle de força.

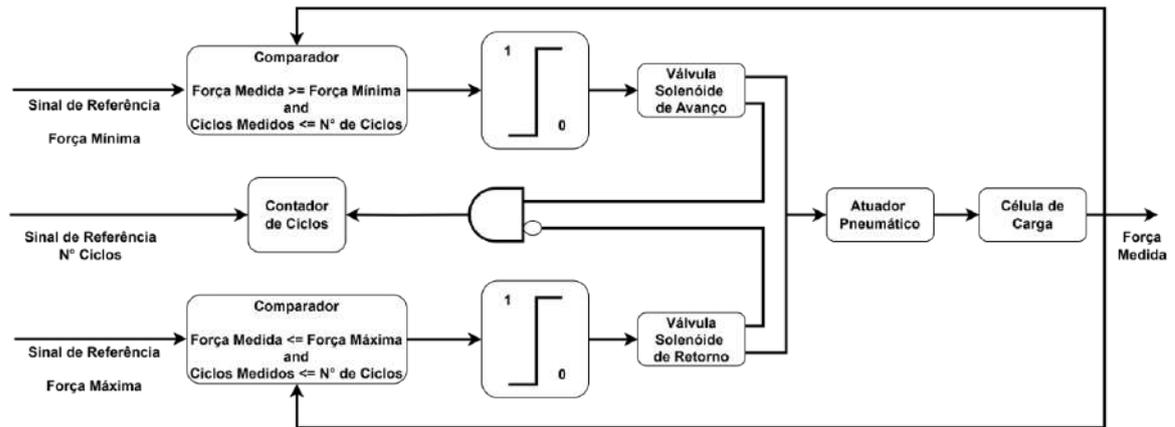


Figura 3.35: Diagrama de blocos do sistema de controle de força.

Analisando a figura, é possível notar que a lógica por trás dos acionamentos de cada válvula se dá através de duas comparações, caso a força seja maior ou menor os valores de *setpoints* definidos pelo usuário ou se o número de ciclos já terminou.

Percebe-se que a estratégia para o acionamento das válvulas solenóides envolve duas comparações. Uma delas verifica se a força medida pelo transdutor é superior ou inferior aos valores de *setpoint* definidos pelo usuário, enquanto a segunda comparação verifica se o número de ciclos foi atingido. Destaca-se que um ciclo só é contabilizado quando há ocorrência de um movimento de avanço e um de retorno, justificando assim a presença da porta lógica AND com uma das entradas barradas na figura.

O capítulo a seguir irá abordar os resultados das duas abordagens de controle do projeto.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Controle de frequência

Essa seção irá mostrar o resultado de um ensaio preliminar do projeto ao se utilizar a abordagem de controle em malha aberta de força, ou controle de frequência. A figura 4.1 apresenta o resultado de um ensaio de 2.000 ciclos à uma frequência de 10 Hz.

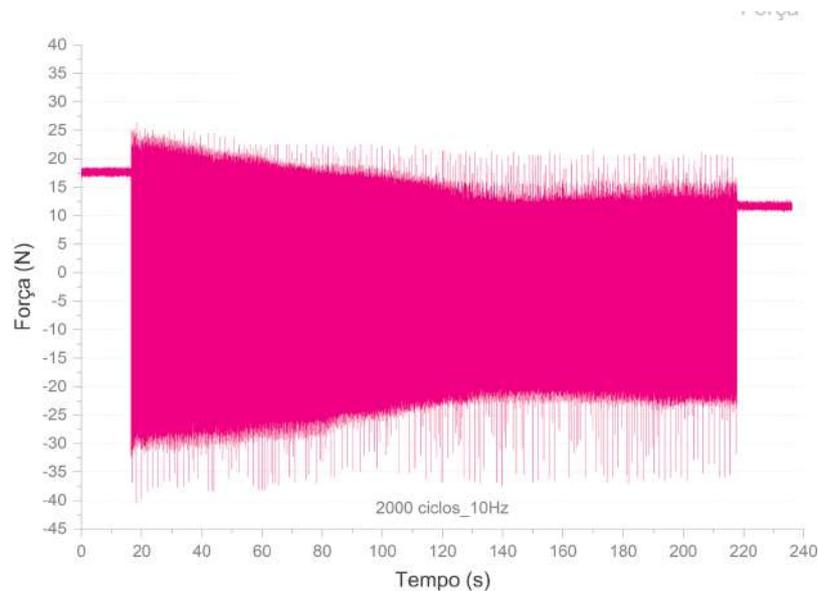


Figura 4.1: Gráfico de força (N) por tempo (s) de um ensaio por controle de frequência.

Nota-se que a força durante o ensaio não se manteve regular em nenhum momento, mesmo com a pressão do sistema tendo sido mantida constante com o sistema de regulação de pressão. Isso corrobora a explicação citada anteriormente de que existem não linearidades no atuador pneumático quanto a ação de carregamento e descarregamento, visto que os valores de força de tração e compressão se comportaram de forma distinta.

É válido ressaltar que, ao se utilizar o modo de controle de frequência, o sistema só poderá assumir o tipo de movimento *two-way*. Em suma, esta abordagem se tornou completamente ineficaz e não confiável. Dito isso, a abordagem de controle de força foi desenvolvida para mitigar os problemas apresentados pelo sistema de malha aberta e ser possível aplicar as duas formas de movimentação para o *monopile*.

4.2 Controle de força

Essa seção tem por objetivo apresentar os resultados dos ensaios ao se utilizar a estratégia de controle em malha fechada e como esses resultados foram avaliados e interpretados. A tabela 4.1 apresenta a quantidade de ciclos de carregamento e valores de *setpoints* escolhidos para cada um dos oito ensaios feitos. Foram feitos dois ensaios para cada tipo de movimentação com o objetivo de ser possível fazer comparações entre os resultados.

A quantidade de ciclos de carregamento na fundação foram baseadas nos valores que as torres eólicas são submetidas durante seu período de vida útil (10^7 ciclos). Ainda, destaca-se que os ensaios foram feitos utilizando a forma de movimentação mais exigente à fundação que é a do tipo *one-way* e que seus valores de *setpoint* máximo de força foram escolhidos por serem frações dos valores obtidos nos ensaios monotônicos (que levam até o valor necessário de força para que haja a ruptura do solo) que podem ser vistos em (LEMOS, 2023) [15].

	Quantidade de Ciclos	<i>Setpoints</i> (N)
Ensaio 1	1.000	80 - 0
Ensaio 2	1.000	45 - 0
Ensaio 3	10.000	45 - 0
Ensaio 4	10.000	80 - 0
Ensaio 5	50.000	80 - 0
Ensaio 6	50.000	80 - 0
Ensaio 7	100.000	80 - 0
Ensaio 8	100.000	80 - 0

Tabela 4.1: Ensaios de controle de força, suas quantidades de ciclos e valores de *setpoint*.

A apresentação dos resultados será feita a partir da apresentação de três gráficos para cada ensaio. Sendo uma figura utilizada para ilustrar o ensaio completo e as duas restantes são utilizadas para mostrar o comportamento do sistema no início e no final do ensaio, respectivamente. Por fim, a cada dupla de ensaios apresentados, é apresentada uma tabela com as métricas necessárias para avaliar o comportamento do sistema.

4.2.1 Ensaio de 1.000 ciclos

A figura 4.2 apresenta o resultado final do primeiro ensaio, enquanto as figuras 4.3(a) e 4.3(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

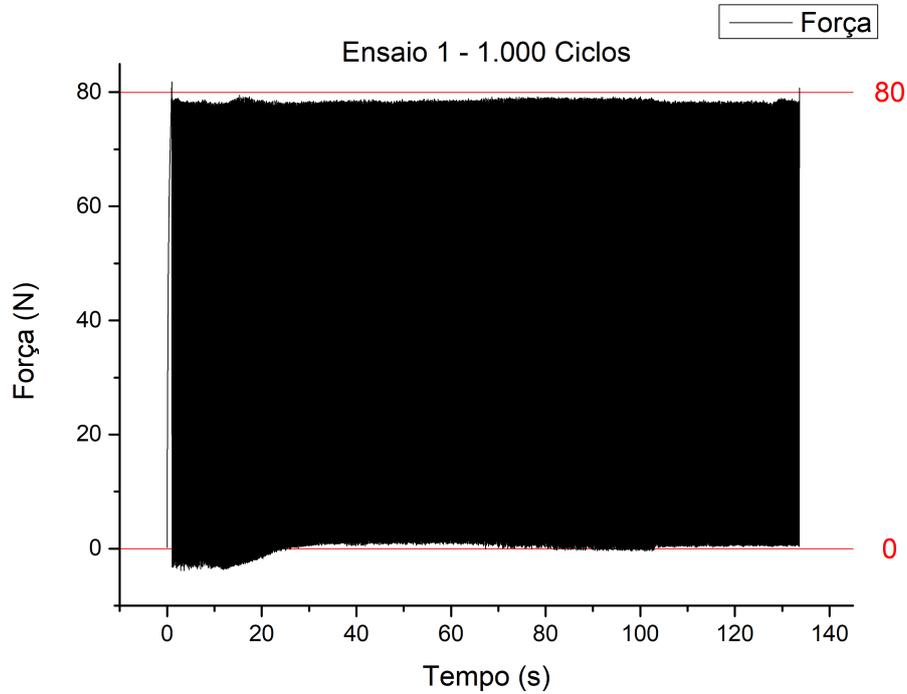


Figura 4.2: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 1.

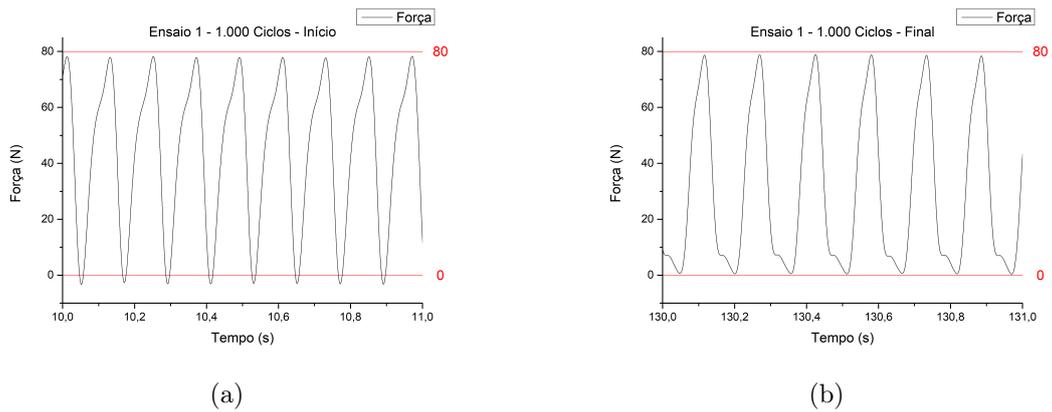


Figura 4.3: Período inicial e final do ensaio 1.

A figura 4.4 apresenta o resultado final do segundo ensaio, enquanto as figuras 4.5(a) e 4.5(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

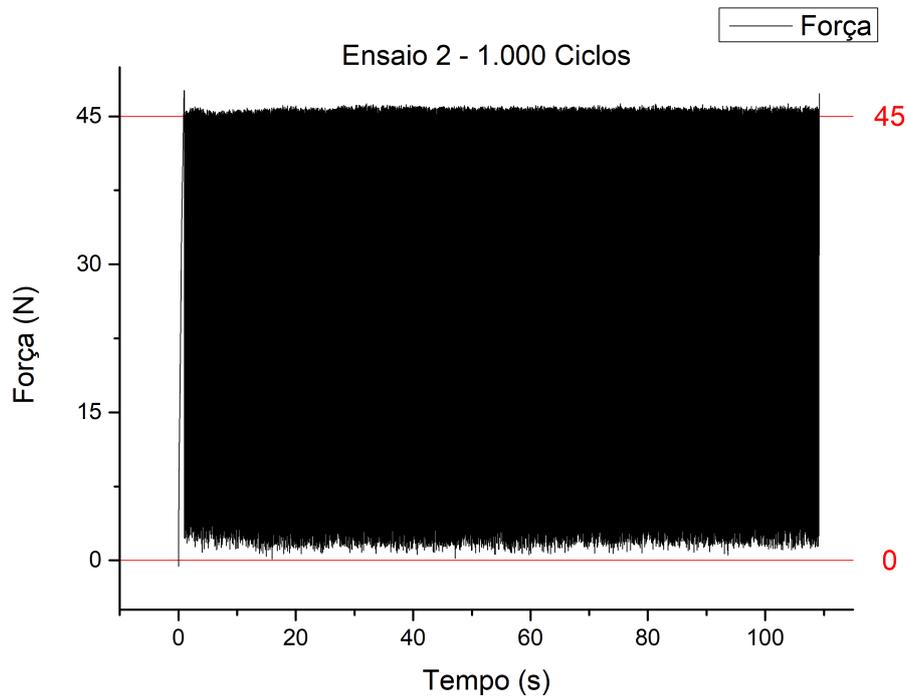


Figura 4.4: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 2.

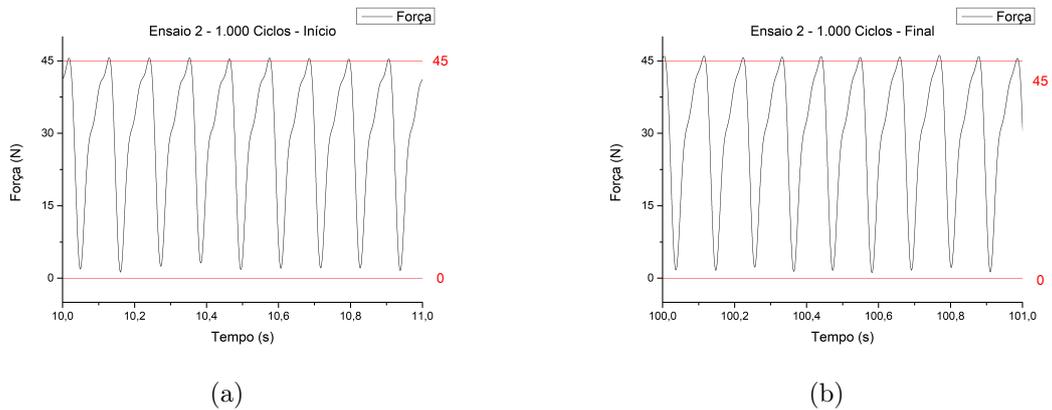


Figura 4.5: Período inicial e final do ensaio 2.

A tabela 4.2 apresenta as métricas utilizadas para analisar os dados coletados dos dois ensaios de 1.000 ciclos.

	Ensaio 1	Ensaio 2
Setpoints - (N)	80 - 0	45 - 0
Força Máxima - (N)	78,481	45,765
Força Mínima - (N)	-0,058	1,752
Erro Força Máx.- (N)	1,519	-0,765
Erro Força Mín. - (N)	0,058	1,752
Erro Médio - (N)	0,789	0,493
Desv. Padrão F. Máx. - (N)	0,347	0,203
Desv. Padrão F. Mín. - (N)	1,298	0,518
Desv. Padrão Médio - (N)	0,822	0,361
Frequência Média - (Hz)	7,592	9,242

Tabela 4.2: Comparação entre ensaios de 1.000 ciclos.

Analisando os ensaio 1 e 2, nota-se que o sistema obteve valores de força máxima e mínima médios extremamente satisfatórios, ocasionando em um erro absoluto muito baixo comparado aos valores de *setpoints*. Foi analisado ainda os valores de desvio padrão entre os valores de referência de entrada do sistema e pôde-se concluir que o ensaio 2 obteve um ótimo resultado com seus valores abaixo de 0,5 aproximadamente. Entretanto, o ensaio 1 não obteve um valor de desvio padrão muito bom durante seus valores mínimos, tendo um desvio maior que 1 apesar de que, caso apenas os valores médios sejam analisados, ambos os ensaios obtiveram bons valores.

Em suma, os ensaios apresentaram valores altamente gratificantes e puderam ser comparados entre si mesmo com a diferença entre os valores de força máxima aplicada. Entretanto, é necessário ressaltar que os valores de frequência média não foram satisfatórios durante o primeiro ensaio. As possíveis explicações para que este erro tenha ocorrido são: dificuldades para calibrar as válvulas reguladores de fluxo e uma possível resposta não linear do solo sob a estrutura durante o ensaio.

4.2.2 Ensaio de 10.000 ciclos

A figura 4.6 apresenta o resultado final do terceiro ensaio, enquanto as figuras 4.7(a) e 4.7(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

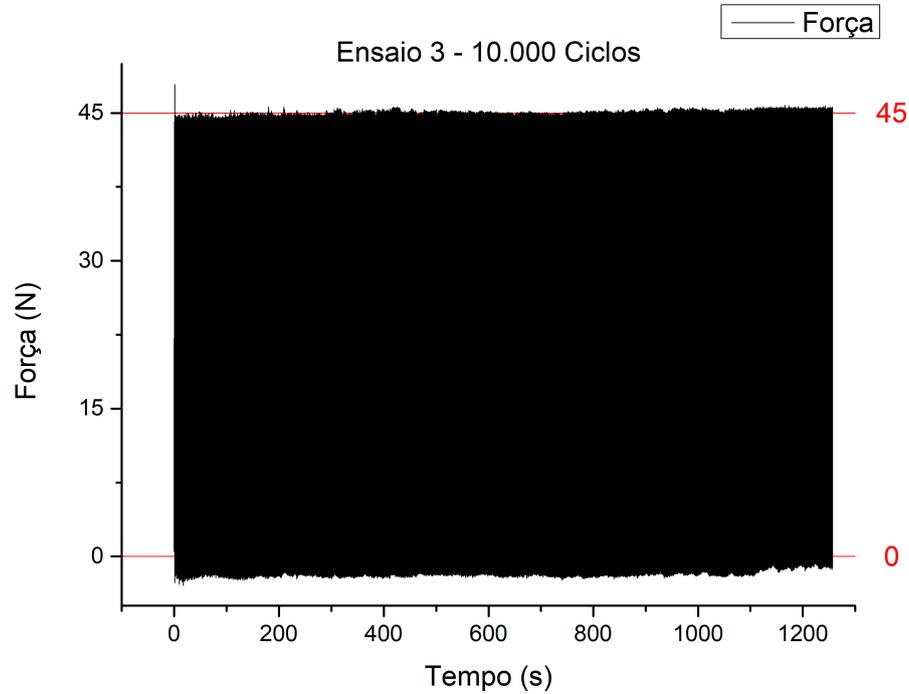


Figura 4.6: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 3.

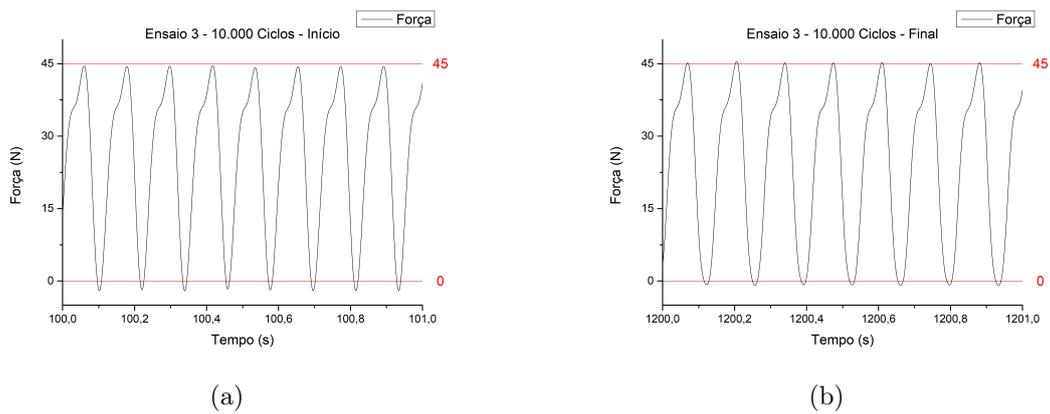


Figura 4.7: Período inicial e final do ensaio 3.

A figura 4.8 apresenta o resultado final do quarto ensaio, enquanto as figuras 4.9(a) e 4.9(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

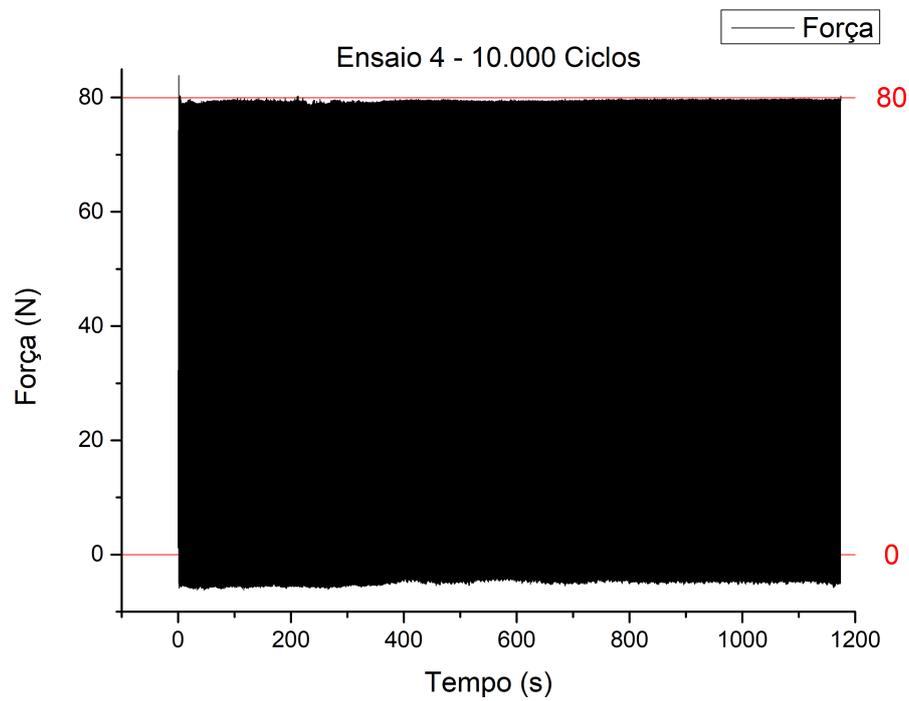


Figura 4.8: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 4.

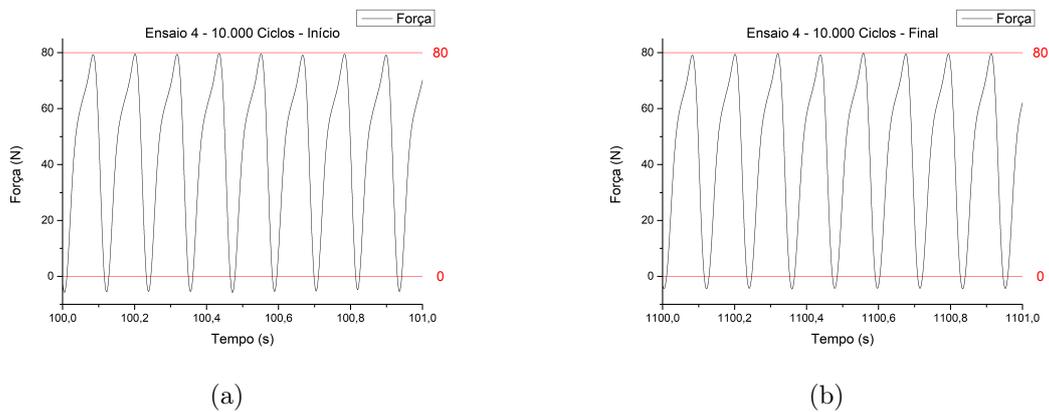


Figura 4.9: Período inicial e final do ensaio 4.

A tabela 4.3 apresenta as métricas utilizadas para analisar os dados coletados dos dois ensaios de 10.000 ciclos.

	Ensaio 3	Ensaio 4
Setpoints - (N)	45 - 0	80 - 0
Força Máxima - (N)	44,867	79,285
Força Mínima - (N)	-1,723	-4,833
Erro Força Máx. - (N)	0,133	0,715
Erro Força Mín. - (N)	1,723	4,833
Erro Médio - (N)	0,928	2,774
Desv. Padrão F. Máx. - (N)	0,301	0,262
Desv. Padrão F. Mín. - (N)	0,294	0,453
Desv. Padrão Médio - (N)	0,297	0,358
Frequência Média - (Hz)	7,972	8,526

Tabela 4.3: Comparação entre ensaios de 10.000 ciclos.

A tabela 4.3 apresenta os valores dos ensaios 3 e 4 e, primeiramente, é possível notar que erro absoluto entre os valores máximos foi extremamente baixo. Sendo, em ambos os ensaios, abaixo de 1N. Entretanto, ao se analisar os valores de força mínima, o valor obtido para o ensaio 2 se resalta por ser igual a aproximadamente 6% do valor total da faixa de carregamento. Esse valor, apesar de ser aceitável para o tipo de aplicação, foi considerado alto. Uma possível interpretação para esse valor é que ocorreu uma dessincronização entre os valores aplicados como *inputs* no *software* de automação e os valores lidos pelo sistema de referência durante o processo de carregamento da fundação até o valor de força máximo. Por fim, ao se analisar os desvios padrões, nota-se que houve uma baixíssima dispersão entre os valores medidos, sendo importante destacar que o maior valor de dispersão foi igual a aproximadamente a 0,45 para força mínima do segundo ensaio, ou seja, um valor muito baixo e bastante satisfatório.

Resumindo, os ensaios 3 e 4, assim como os ensaios 1 e 2, obtiveram valores finais excepcionalmente bons, o que tornou possível inferir que não houveram grandes diferenças de resultados entre 1.000 ciclos e 10.000 ciclos de carregamentos cíclicos. Contudo, assim como nos ensaios anteriores, os valores de frequência média não corresponderam da forma esperada.

4.2.3 Ensaio de 50.000 ciclos

A figura 4.10 apresenta o resultado final do quinto ensaio, enquanto as figuras 4.11(a) e 4.11(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

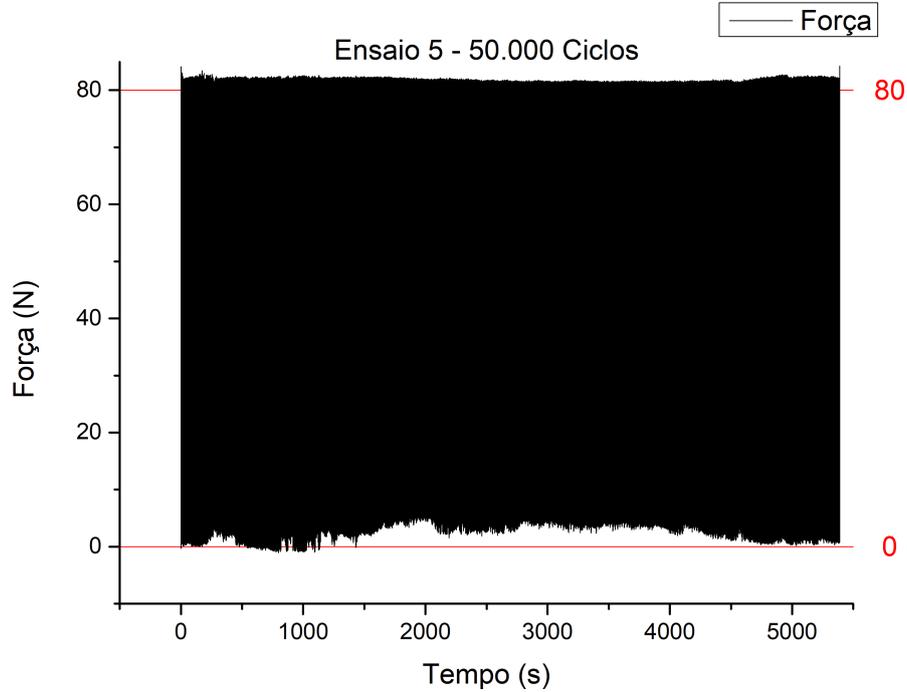


Figura 4.10: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 5.

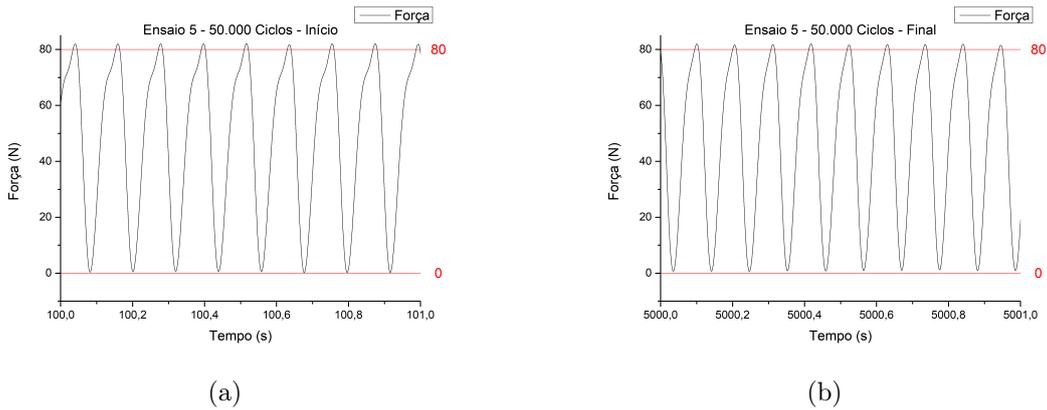


Figura 4.11: Período inicial e final do ensaio 5.

A figura 4.12 apresenta o resultado final do sexto ensaio, enquanto as figuras 4.13(a) e 4.13(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

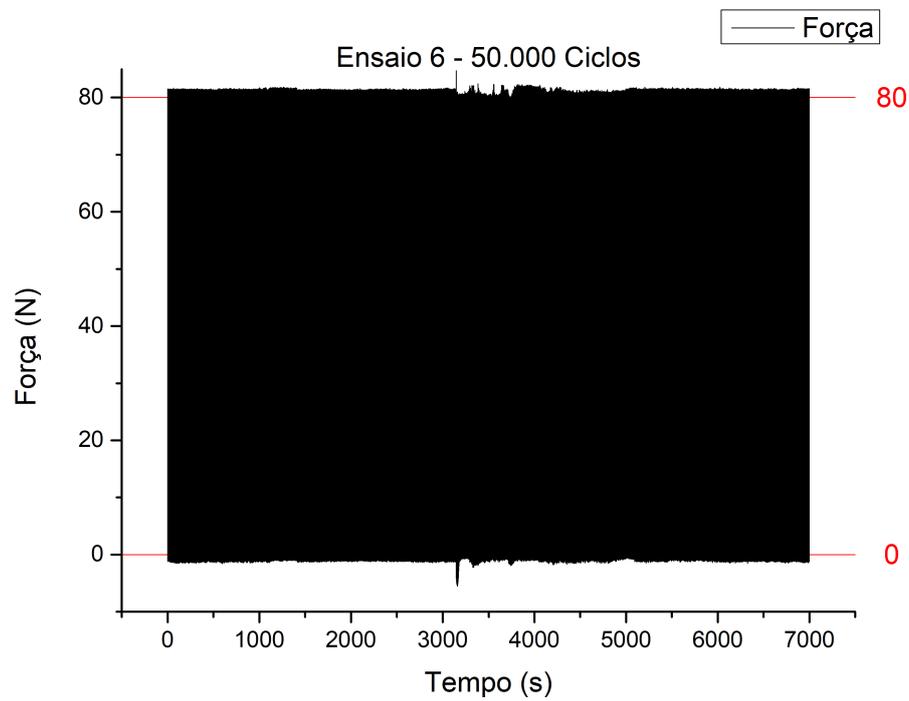


Figura 4.12: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 6.

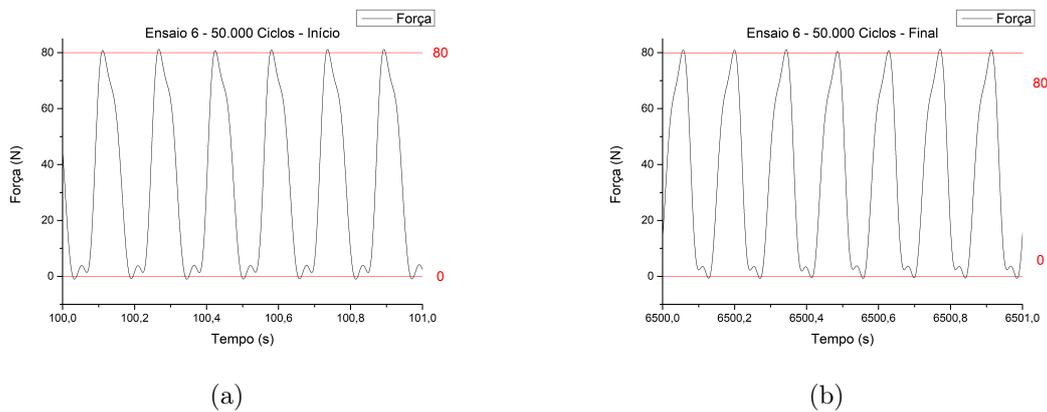


Figura 4.13: Período inicial e final do ensaio 6.

A tabela 4.4 apresenta as métricas utilizadas para analisar os dados coletados dos dois ensaios de 50.000 ciclos.

	Ensaio 5	Ensaio 6
Setpoints - (N)	80 - 0	80 - 0
Força Máxima - (N)	81,621	81,017
Força Mínima - (N)	2,733	-0,832
Erro Força Máx. - (N)	1,621	1,017
Erro Força Mín. - (N)	2,733	0,832
Erro Médio - (N)	2,177	0,924
Desv. Padrão F. Máx. - (N)	0,365	0,403
Desv. Padrão F. Mín. - (N)	1,560	0,363
Desv. Padrão Médio - (N)	0,963	0,383
Frequência Média - (Hz)	9,303	7,159

Tabela 4.4: Comparação entre ensaios de 50.000 ciclos.

Com os valores apresentados na tabela acima, ressalta-se os bons valores obtidos de forças máxima e mínima. Em especial, os resultados obtidos pelo ensaio 6, que obteve um erro médio das duas forças menor que 1N. Entretanto, apesar dos valores estarem diferentes comparados aos do ensaio 5, o ensaio 5 obteve erros de 2 e 3% para a força máxima e mínima em comparação com a faixa total de carregamento, tornando os resultados extremamente satisfatórios. Quanto aos valores de dispersão, o ensaio 6 também obteve um melhor resultado do que o ensaio 5 que alcançou uma maior dispersão nos valores mínimos.

De maneira geral, o ensaio 6 obteve resultados muito satisfatórios e superiores que o seu par. Entretanto, os valores obtidos no ensaio 5 também tenham sido satisfatórios. Por fim, sobre a frequência média, o ensaio 5 obteve um ótimo resultado e próximo do desejado, ao contrário de seu par.

4.2.4 Ensaios de 100.000 ciclos

A figura 4.14 apresenta o resultado final do sétimo ensaio, enquanto as figuras 4.15(a) e 4.15(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

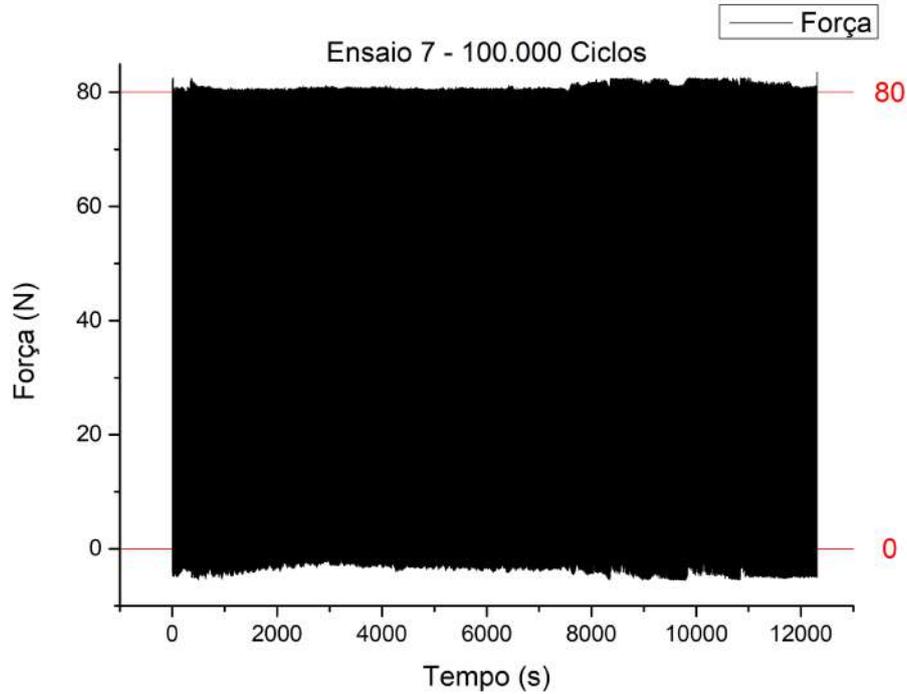


Figura 4.14: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 7.

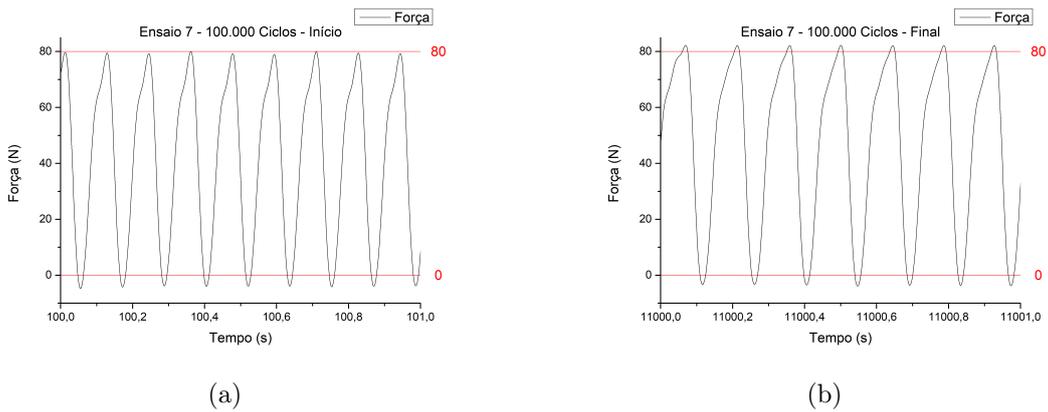


Figura 4.15: Período inicial e final do ensaio 7.

A figura 4.16 apresenta o resultado final do oitavo ensaio, enquanto as figuras 4.17(a) e 4.17(b) apresentam um período inicial e final do ensaio.

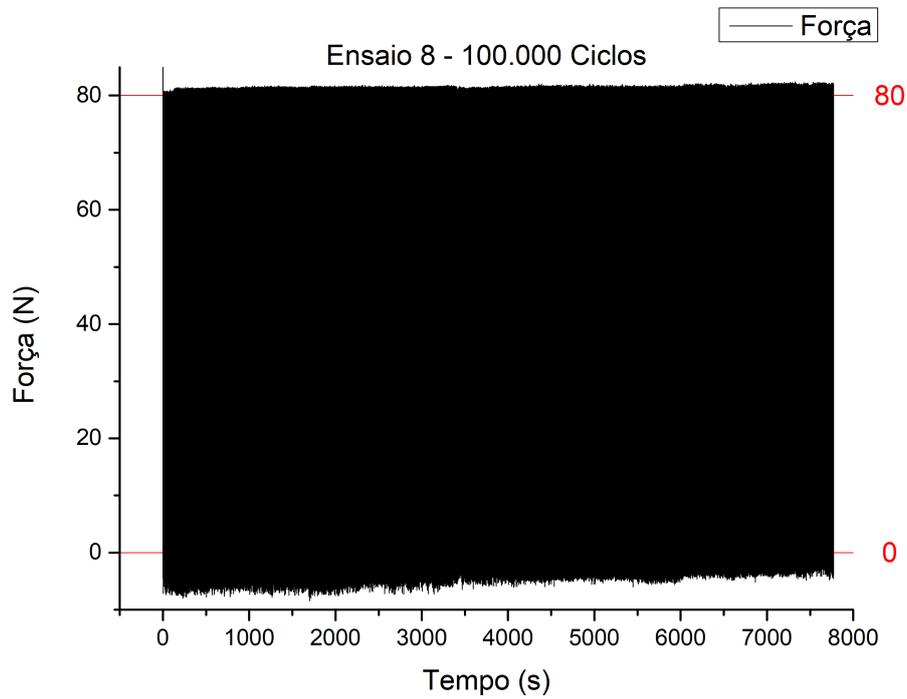
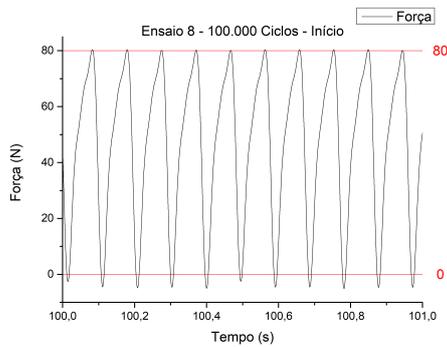
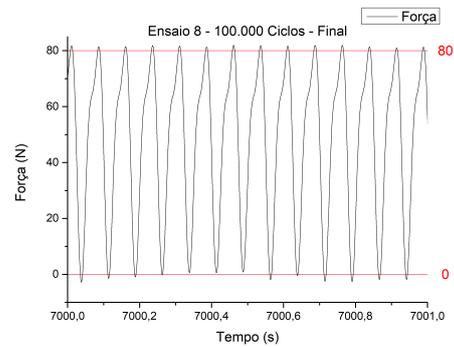


Figura 4.16: Gráfico de força (N) por tempo (s) do ensaio 8.



(a)



(b)

Figura 4.17: Período inicial e final do ensaio 8.

A tabela 4.5 apresenta as métricas utilizadas para analisar os dados coletados dos dois ensaios de 100.000 ciclos.

	Ensaio 7	Ensaio 8
Setpoints - (N)	80 - 0	80 - 0
Força Máx. - (N)	80,600	81,091
Força Mín. - (N)	-3,344	-2,660
Erro F. Máx. - (N)	0,600	1,091
Erro F. Mín. - (N)	3,344	2,660
Erro Médio - (N)	1,972	1,875
Desv. Padrão F. Máx. - (N)	0,681	0,305
Desv. Padrão F. Mín. - (N)	0,868	1,707
Desv. Padrão Médio - (N)	0,775	1,006
Frequência Média - (Hz)	8,138	14,566

Tabela 4.5: Comparação entre ensaios de 100.000 ciclos.

Ao término dos últimos ensaios, caracterizados por uma maior duração devido ao aumento do número de ciclos, os resultados, mais uma vez, se tornaram semelhantes aos previamente apresentados em outros experimentos com uma menor quantidade de ciclos. É válido ressaltar os baixíssimos valores de erro absoluto para os dois ensaios, sendo o maior valor médio de erro igual a apenas 4% da faixa total de carregamento do sistema. Destaca-se, ainda, os baixos valores de desvio padrão para o ensaio 7, contudo, o ensaio 8 obteve desvios maiores que 1 para os dois valores de *input*, isso comprova que houve uma maior dispersão entre os valores.

Por fim, é possível afirmar que ambos os ensaios obtiveram um bom resultado, visto a quantidade de ciclos e tempo necessário para término do ensaio, apesar dos valores de despesão do ensaio 8. E, última análise, os dois ensaios obtiveram grandes problemas quanto a frequência média de aplicação de carregamentos cíclicos na fundação, sendo um abaixo do esperado e outro acima.

Capítulo 5

Conclusões e próximos trabalhos

O presente trabalho é uma continuação de uma série de trabalhos desenvolvidos no LM²C sobre o tema de energias renováveis e empregou uma grande multidisciplinaridade, combinando conhecimentos de áreas como geotecnia, instrumentação e sistemas de controle.

De forma geral, os ensaios cíclicos utilizando abordagem de controle em malha fechada obtiveram resultados extremamente satisfatórios, com baixos valores de erro absoluto e desvio padrão no geral, obtendo, então, valores muito próximos de uma movimentação do tipo *one-way* perfeita. Diferentemente da estratégia em malha aberta que se tornou extremamente insatisfatória e exclusivamente utilizada para movimentação *two-way*. Ainda, comprovou-se que a quantidade de ciclos não alteraram as métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos procedimentos, visto que todos os ensaios alcançaram resultados similares.

Um ponto observado durante os ensaios foi que o valor de força mínimo (valor 0N para movimentação *one-way*) sempre obteve um valor de erro absoluto maior que o valor de força máxima. Uma possível explicação para este fenômeno é o efeito de inércia sobre o modelo, que tende a se manter em um movimento durante o retorno do atuador até a posição de 0N.

Um grande problema observado nos ensaios foi a incapacidade de se manter uma frequência média de 10 Hz durante os carregamentos cíclicos. A princípio, a frequência de acionamento se daria em função da rigidez do solo e do ajuste de válvulas reguladoras de fluxo de forma manual. Entretanto, o resultado não se mostrou igual ao esperado. Possíveis explicações para os resultados obtidos são um possível efeito não linear do solo, um erro de calibração das válvulas ou até o desgaste do equipamento por fadiga devido a quantidade de ciclos aplicada.

Ainda, ficou comprovado que o sistema desenvolvido para o projeto é robusto o suficiente para suportar ensaios com longos períodos de duração, visto que ensaios com 100.000 ciclos alcançaram a marca de até 4 horas de duração, e por suportar um ambiente gravitacional elevado.

Por fim, dado o contexto de torres eólicas *offshore* no país, este trabalho contribui para a compreensão sobre os carregamentos de eventos naturais sobre fundações de torres eólicas, no ponto de vista da instrumentação e área de controle.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Utilizar uma válvula proporcional para controlar o pistão pneumático, sendo possível aplicar métodos de controle mais robustos com objetivo de melhorar o controle da frequência de carregamentos. Dessa forma seria possível obter um controle da força e frequência de aplicação de carregamentos, descartando o uso de válvulas solenoides e reguladoras de fluxo.
- Utilizar um sistema de aquisição de dados que também possua portas digitais com objetivo de centralizar o processo de *datalogging* e controle de acionamento de válvulas solenoides para aplicar o carregamento na fundação.
- Utilizar uma célula de carga com faixa de valores mais próxima do utilizado pelo projeto e melhorar o processo de calibração da célula de carga com mais pontos ou utilizar uma máquina de ensaios a fim de reduzir as oscilações durante o processo e melhorar seu desempenho.
- Aplicar valores de carregamento até a ordem de 10^7 ciclos conforme a vida útil das fundações.

Referências Bibliográficas

- [1] Broadbent Inc. "Operating Manual for GT6/0.75 Geotechnical Beam Centrifuge". 2011.
- [2] ASSOCIATION, E. W. E. *The economics of wind energy*. EWEA, 2009.
- [3] COUNCIL-GWEC, G. W. E. "Global wind report 2022". 2023.
- [4] "Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz Elétrica Brasileira". <https://urx1.com/FSgbc>. Acessado em: 2023-09-01.
- [5] MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [6] DHABI, A. "International renewable energy agency - IRENA. Innovation outlook: offshore wind". 2016.
- [7] PISANÒ, F. "Input of advanced geotechnical modelling to the design of offshore wind turbine foundations", *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019: Geotechnical Engineering foundation of the future*, pp. 1–6, 2019.
- [8] ABADIE, C. N., BYRNE, B. W., HOULSBY, G. T. "Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests", *Géotechnique*, v. 69, n. 10, pp. 863–876, 2019.
- [9] MUSIAL, W., SPITSEN, P., DUFFY, P., et al. *Offshore Wind Market Report: 2022 Edition. U.S. Department of Energy (DOE), Energy Efficiency Renewable Energy (EERE)*. Relatório técnico, 2022.
- [10] BARRA, M. *Centrifuge Modelling of monopile foundation for offshore wind turbines*. Ms.C. dissertação, COPPE/UFRJ, COPPE/UFRJ, 2020.
- [11] GOMES, N. F. *Estudo de parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos de areias quartzosa e carbonatadas*. Ms.C. dissertação, COPPE/UFRJ, COPPE/UFRJ, 2020.

- [12] FERREIRA, G. S., ANDREU, I. A. T., LEMOS, S. P., et al. “Modelagem Centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada”. Disponível em : <https://proceedings.science/p/149141.>, 2022. Acessado em: 2023-09-29.
- [13] LOPES, G. K., DE SOUSA, J. R. M., DE ALMEIDA, M. C., et al. “A numerical methodology to predict the lateral load response of monopiles installed in SAND considering soil stiffness degradation”, *Ocean Engineering*, v. 270, pp. 113723, 2023.
- [14] ALMEIDA, M. S. S., A. M. C. F. T. P. C. E. A. “Ensaio monotônicos e cíclicos de carga lateral em monopiles em areias quartzosa e carbonatada através de modelagem centrífuga.” *Anais[...] Porto*, set. 2023.
- [15] LEMOS, S. P. *Comportamento dinâmico de turbinas eólicas offshore sob carregamento lateral cíclico*. Ds.C. tese, COPPE/UFRJ, 2023.
- [16] IRENA, R. E. B. “Leveraging Local Capacity for Offshore Wind”, *IRENA, Abu Dhabi*, 2018.
- [17] ARANY, L., BHATTACHARYA, S., MACDONALD, J., et al. “Simplified critical mudline bending moment spectra of offshore wind turbine support structures”, *Wind Energy*, v. 18, n. 12, pp. 2171–2197, 2015.
- [18] NIKITAS, G., VIMALAN, N. J., BHATTACHARYA, S. “An innovative cyclic loading device to study long term performance of offshore wind turbines”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 82, pp. 154–160, 2016.
- [19] KIRKWOOD, P. B. *Cyclic lateral loading of monopile foundations in sand*. Tese de Doutorado, University of Cambridge Cambridge, 2016.
- [20] DNVGL. “DNVGL-ST-0126 - Offshore structures for wind turbines.” *Det Norske Veritas, Horvik, Norway, Draft*, 2016.
- [21] LEBLANC, C., HOULSBY, G. T., BYRNE, B. W. “Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading”, *Géotechnique*, v. 60, n. 2, pp. 79–90, 2010.
- [22] KLINKVORT, R. T. *Centrifuge modelling of drained lateral pile - soil response*. Ds.C. tese, Technical University of Denmark, 2012.
- [23] MADABHUSHI, G. *Centrifuge modelling for civil engineers*. CRC press, 2014.

- [24] PEQUENO, J. *Comportamento de dutos enterrados sujeitos a movimentos de massa em solos*. Ms.C. dissertação, COPPE/UFRJ, COPPE/UFRJ, 2013.
- [25] GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO, M. E. *Control System Design*. Pretence Hall, 2000.
- [26] OGATA, K. *Modern control engineering fifth edition*. 2010.
- [27] TARAZONA, S. F., ALMEIDA, M. S., ROMANEL, C. *Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral e Axial de Dutos em Leito Marinho Arenoso*. Tese de Doutorado, Dissertação de Mestrado, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro . . . , 2015.
- [28] FERREIRA, G. S. “Modelagem centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada”, 2021. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [29] FAGUNDES, D. F. *Modelagem física de estruturas offshore assentes em leito marinho*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [30] HOTTA, M. M. *Estudos de fluxo de detritos submarinos através de métodos experimentais, analíticos e numéricos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- [31] GUIMARÃES, M. P. P. “Modelagem centrífuga da movimentação lateral de dutos em areia”, 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [32] PESSIN, J. “Movimentação axial e lateral de dutos com controle de força vertical”, 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [33] BYRNE, B. W.; HOULSBY, G. T. “Foundations for offshore wind turbines.” , *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, (361)*, pp. 2909–2930, 2003.
- [34] Analog Devices. AD620 Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier. 2011.
- [35] BARBOZA, R. “Estudo de métodos para medição de Gmax com Air-Hammer em ensaios centrífugos de solos arenosos.” 2023. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro.