

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

**Sistema embarcado para monitoramento e
controle automático de ensaios de cisalhamento
direto**

Autor: Matheus Oliveira Dias
Orientador: Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard

Brasília, DF
2023



Matheus Oliveira Dias

**Sistema embarcado para monitoramento e controle
automático de ensaios de cisalhamento direto**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard

Brasília, DF

2023

Matheus Oliveira Dias

Sistema embarcado para monitoramento e controle automático de ensaios de cisalhamento direto/ Matheus Oliveira Dias. – Brasília, DF, 2023-
119 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Eletrônica Embarcada. 2. Cisalhamento Direto. I. Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Sistema embarcado para monitoramento e controle automático de ensaios de cisalhamento direto

CDU

Matheus Oliveira Dias

Sistema embarcado para monitoramento e controle automático de ensaios de cisalhamento direto

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard
Orientador

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 1

**Prof. Dr. Robinson Andrés Giraldo
Zuluaga**
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que dedicaram grande parte de suas vidas ao meu preparo pessoal e acadêmico.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por todas as oportunidades, pela capacidade intelectual e pelo sustento que me têm dado.

Aos meus pais e à minha irmã, que sempre demonstraram cuidado e carinho me acompanhando em todas as etapas da minha formação acadêmica.

Ao meu amor, por ter me apoiado na jornada deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Guillermo, pelas instruções, atenção e auxílio em diversas fases da minha graduação.

À equipe do INFRALAB, pelo apoio ao projeto.

A todos os professores e funcionários da UnB pelas contribuições diretas e indiretas à minha graduação.

*“Estou plenamente certo de que
aquele que começou boa obra em vós há de
completá-la até ao Dia de Cristo Jesus.”*

Bíblia Sagrada (ARA), Filipenses 1:6

Resumo

Uma adequada investigação dos solos pode ser de grande serventia nos processos de construção, reduzindo atrasos e prejuízos. Para essa investigação, uma propriedade importante é a resistência ao cisalhamento que o solo apresenta. Tal propriedade pode ser mensurada através de dados obtidos em ensaios como o ensaio de cisalhamento direto. O Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília conta com uma máquina que realiza esse tipo de ensaio de forma automatizada, porém não estava em atividade devido à necessidade de término do processo de *retrofit* à qual estava sendo submetida. Utilizando os conceitos de sistemas de controle e de sistemas embarcados para o controle de equipamentos de engenharia, foi desenvolvida uma proposta de solução para o desenvolvimento final do sistema embarcado que realiza o monitoramento e o controle da máquina como mais uma etapa desse processo de *retrofit*. Os resultados do aperfeiçoamento do sistema de controle pneumático e da finalização da integração entre o *software* de alto nível e o *software* de baixo nível se mostraram positivos, permitindo a execução de ensaios de cisalhamento direto completos contando com um sistema moderno e um controle pneumático adequado. O sistema conta, também, com documentação técnica e manual para o usuário, e pode ter suas funcionalidades ampliadas em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Cisalhamento Direto. *Raspberry Pi*. *Retrofit*. Sistemas de Controle Embarcados. Sistemas Embarcados.

Abstract

An adequate investigation of soils can be of great service in the construction process, reducing delays and losses. For this investigation, an important property is the shear strength of the soil. This property can be measured through data obtained in tests such as the direct shear test. The Laboratory of Infrastructure of the University of Brasilia has a machine that performs this type of test in an automated way, but it was not in activity due to the need to finish the retrofit process to which it was being submitted. Using the concepts of control systems and embedded systems for the control of engineering equipment, a solution proposal was developed for the final development of the embedded system that performs the monitoring and control of the machine as another step in this retrofit process. The results of the improvement of the pneumatic control system and the finalization of the integration between the high level software and the low level software were positive, allowing the execution of complete direct shear tests with a modern system and an adequate pneumatic control. The system also has technical documentation and a user's manual, and may have its functionalities expanded in future works.

Key-words: Direct Shear. Embedded Control Systems. Embedded Systems. Raspberry Pi. Retrofit.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB - Original . . .	30
Figura 2 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB - Após primeiros projetos	30
Figura 3 – Representação das forças atuantes	36
Figura 4 – Vista transversal do ensaio de cisalhamento direto	37
Figura 5 – Exemplos de Microprocessador e Microcontrolador	39
Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta	42
Figura 7 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada	43
Figura 8 – Diagrama de blocos de um controlador <i>on-off</i>	44
Figura 9 – Diagrama de blocos de um controlador <i>on-off</i> com histerese	44
Figura 10 – Curva representativa de um controlador <i>on-off</i>	45
Figura 11 – Diagrama de blocos de exemplo do controlador PID	46
Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em cascata	46
Figura 13 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB completa - Original	49
Figura 14 – Diagrama elétrico do equipamento original	50
Figura 15 – Sensor de deslocamento	51
Figura 16 – Células de carga	53
Figura 17 – Painel Digital DIN	53
Figura 18 – Servo Motor SM2337DT	54
Figura 19 – Tela do <i>software</i> original da máquina	56
Figura 20 – Esquemático do Sistema Pneumático original	57
Figura 21 – Diagrama do Sistema Pneumático após os desenvolvimentos iniciais	60
Figura 22 – Diagrama inicial de funcionamento do sistema eletrônico	62
Figura 23 – <i>Raspberry Pi 4B</i>	62
Figura 24 – Válvula simples solenoide	65
Figura 25 – Hierarquia do <i>backend</i> do <i>software</i>	66
Figura 26 – Exemplos de páginas da interface	66
Figura 27 – Controle inicial do sistema pneumático	69
Figura 28 – Fluxograma do controle <i>on-off</i> das válvulas solenoides	71
Figura 29 – Tanque de armazenamento de ar	71
Figura 30 – Comparação entre os picos no controle com e sem reservatório (<i>setpoint</i> = 2000 e histerese = 50)	72
Figura 31 – Controle das válvulas com restrição adicionada (histerese = 50)	73
Figura 32 – Controle das válvulas com restrição (histerese = 50)	73
Figura 33 – Válvula proporcional de pressão de ar	74

Figura 34 – Funcionamento linear da válvula proporcional pneumática	75
Figura 35 – Diagrama pneumático da proposta de solução	76
Figura 36 – Esquemático do Circuito <i>Driver</i> para a Válvula Proporcional	77
Figura 37 – Teste de leitura dos sensores	80
Figura 38 – Código exemplo de acionamento do <i>buzzer</i>	81
Figura 39 – Teste dos <i>sockets</i> - Envio de dados pela interface	82
Figura 40 – Teste dos <i>sockets</i> - Recebimento de dados da interface	82
Figura 41 – Fluxograma de funcionamento do programa com <i>threads</i> e <i>timers</i>	83
Figura 42 – <i>Script</i> de inicialização automática 1	84
Figura 43 – <i>Script</i> de inicialização automática 2	84
Figura 44 – Parâmetros de calibragem de tela	85
Figura 45 – Placa de Condicionamento Eletrônico com o Circuito <i>Driver</i>	87
Figura 46 – Análise do Circuito <i>Driver</i> em osciloscópio - PWM = 0%	88
Figura 47 – Análise do Circuito <i>Driver</i> em osciloscópio - PWM = 25%	88
Figura 48 – Análise do Circuito <i>Driver</i> em osciloscópio - PWM = 50%	89
Figura 49 – Análise do Circuito <i>Driver</i> em osciloscópio - PWM = 75%	89
Figura 50 – Análise do Circuito <i>Driver</i> em osciloscópio - PWM = 100%	89
Figura 51 – Análise de Linearidade do Circuito <i>Driver</i>	90
Figura 52 – Gráfico do Controle PI da Válvula Proporcional	91
Figura 53 – Diagrama de Integração do Sistema Embarcado	92
Figura 54 – Tela de ajuste de posição inicial	93
Figura 55 – Tela de ativação do pistão de baixa pressão	94
Figura 56 – Tela da Fase de Adensamento - Gráfico	94
Figura 57 – Tela da Fase de Adensamento - Tabela	95
Figura 58 – Tela da Fase de Adensamento - Resultados	95
Figura 59 – Tela de definição dos parâmetros de cisalhamento	96
Figura 60 – Tela da Fase de Cisalhamento - Gráfico	96
Figura 61 – Tela da Fase de Cisalhamento - Tabela	97
Figura 62 – Tela da Fase de Cisalhamento - Resultados	97
Figura 63 – Estrutura das pastas e arquivos	99
Figura 64 – Exemplo do arquivo de dados da fase de adensamento	99
Figura 65 – Exemplo do arquivo de informações do ensaio	100
Figura 66 – Telas de Aviso	101
Figura 67 – Relação Carga x Tensão das Células de Carga	102
Figura 68 – Tela do <i>software</i> de configuração das células de carga	102
Figura 69 – Teste de Configuração das Células de Carga	103
Figura 70 – Análise de Linearidade das Células de Carga	104
Figura 71 – Gráficos do Controle PI Atualizado	105
Figura 72 – Amostra de quartzo utilizada nos testes	106

Figura 73 – Contêiner com a amostra	107
Figura 74 – Máquina com a amostra pronta para o ensaio	107
Figura 75 – Etapa 1 - Ensaio de Cisalhamento Direto	108
Figura 76 – Etapa 2 - Ensaio de Cisalhamento Direto	108
Figura 77 – Etapa 3 - Ensaio de Cisalhamento Direto	109
Figura 78 – Resultados da Fase de Adensamento - Ensaio de Cisalhamento Direto .	109
Figura 79 – Gráfico da Fase de Adensamento - Ensaio de Cisalhamento Direto . . .	110
Figura 80 – Resultados da Fase de Cisalhamento - Ensaio de Cisalhamento Direto .	111
Figura 81 – Gráfico da Fase de Cisalhamento - Ensaio de Cisalhamento Direto . . .	111
Figura 82 – Comparação dos Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto	112

Lista de tabelas

Tabela 1 – Linguagens de programação para sistemas embarcados	41
Tabela 2 – Capacidade do sensor de deslocamento	51
Tabela 3 – Especificações do servo motor	54
Tabela 4 – Especificações de <i>Hardware - Raspberry Pi 4B</i>	63
Tabela 5 – Especificações de Interfaces - <i>Raspberry Pi 4B</i>	63
Tabela 6 – Especificações de <i>Software - Raspberry Pi 4B</i>	63
Tabela 7 – Especificações da válvula proporcional	75
Tabela 8 – Resultados da análise em osciloscópio	88
Tabela 9 – Lista de comandos	98
Tabela 10 – Resultados da configuração da célula de carga normal	103
Tabela 11 – Resultados da configuração da célula de carga cisalhante	103
Tabela 12 – Faixas de operação do controlador PI	105
Tabela 13 – Resultados da análise do controlador	106

Lista de abreviaturas e siglas

UnB	Universidade de Brasília
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura
CI	Circuito Integrado
CPU	Unidade Central de Processamento
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
RS-232	<i>Recommended Standard - 232</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
GB	<i>Gigabyte</i>
HDMI	<i>High Definition Multimedia Interface</i>
ASCII	Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação
GND	<i>Ground</i>

Lista de símbolos

τ	Letra grega minúscula Tau
c'	Coesão
σ	Letra grega minúscula Sigma
ϕ	Letra grega minúscula Fi
N	Tensão Normal
T	Tensão Cisalhante
lb	Libra
kg	Quilograma
$''$	Polegada
in	Polegada
mm	Milímetro
psi	Libras por Polegada Quadrada
ms	Milissegundo
l/min	Litros por minuto
Hz	Hertz
RPS	Rotações por Segundo
kPa	Quilopascal
N/cm^2	Newton por Centímetro Quadrado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Justificativa	30
1.2	Objetivo Geral	31
1.3	Objetivos Específicos	31
1.4	Metodologia	32
1.5	Organização do Trabalho	32
2	REFERENCIAL TEÓRICO	35
2.1	Resistência ao Cisalhamento dos Solos	35
2.1.1	Crítério de Ruptura de Mohr-Coulomb	35
2.2	Ensaio de Cisalhamento Direto	36
2.2.1	Cálculos de Parâmetros	38
2.3	Sistemas Embarcados	38
2.3.1	Microprocessadores e Microcontroladores	39
2.3.2	Partes de um Sistema Embarcado	39
2.3.3	Tipos de Comunicação	40
2.3.4	Programação em Sistemas Embarcados	40
2.4	Princípios de Controle	41
2.4.1	Tipos de Configurações de Sistemas de Controle	42
2.4.1.1	Sistemas em Malha Aberta	42
2.4.1.2	Sistemas em Malha Fechada	43
2.4.2	Controle <i>On-Off</i>	43
2.4.3	Controle PID	45
2.4.4	Controle em Cascata	46
2.5	<i>Retrofit</i>	47
3	O EQUIPAMENTO ORIGINAL	49
3.1	Funcionamento do Equipamento Original	49
3.2	Sistema Eletrônico	50
3.2.1	Sensor de Deslocamento	51
3.2.2	Célula de Carga	52
3.2.3	Servo Motor	54
3.2.3.1	Modo de Posição	55
3.2.3.2	Modo de Velocidade	55
3.3	Sistema de <i>Software</i>	56
3.4	Sistema Pneumático	56

3.5	Estado do Equipamento Original	57
4	DESENVOLVIMENTOS INICIAIS	59
4.1	Características Gerais	59
4.1.1	Sistema Pneumático	60
4.1.2	Sistema Eletrônico	61
4.2	Componentes Utilizados	62
4.2.1	Raspberry Pi 4B	62
4.2.2	Sensor de Deslocamento	64
4.2.3	Célula de Carga	64
4.2.4	Servo Motor	64
4.2.5	Válvulas Solenoides	65
4.3	Software de Alto Nível (Interface)	65
5	PROPOSTA DE SOLUÇÃO	69
5.1	Controle do Sistema Pneumático	69
5.1.1	Otimização do algoritmo de controle	70
5.1.2	Comparação do controle com e sem reservatório	71
5.1.3	Aplicação de uma restrição de ar para a diminuição dos picos no controle	72
5.1.4	Substituição da válvula solenoide de alta pressão por uma válvula proporcional	74
5.1.5	Circuito <i>Driver</i> para a válvula proporcional	77
5.1.6	Controlador PID	77
5.1.7	Proposta para o controle do sistema pneumático	79
5.2	Integração com o Software de Alto Nível	79
5.2.1	Testes Realizados	80
5.2.1.1	Leitura dos sensores	80
5.2.1.2	Ativação do <i>buzzer</i>	80
5.2.1.3	Controle do servo motor	80
5.2.1.4	Controle das válvulas de pressão	81
5.2.1.5	Comunicação via <i>sockets</i>	81
5.2.2	Proposta de Solução para a Integração	81
5.2.2.1	Ativação do <i>buzzer</i>	81
5.2.2.2	Comunicação via <i>socket</i>	82
5.2.2.3	<i>Threads</i> e <i>Timers</i>	83
5.2.3	Melhorias Gerais	84
5.2.3.1	Inicialização automática	84
5.2.3.2	Calibragem de tela	84
5.2.3.3	Teclado Virtual	85
5.3	Documentação e Manuais	85

6	RESULTADOS	87
6.1	Sistema Pneumático	87
6.1.1	Circuito Driver	87
6.1.2	Controle do Sistema Pneumático	90
6.2	Sistema Embarcado	92
6.2.1	Funções do Sistema	92
6.2.1.1	Ajuste de posição inicial	93
6.2.1.2	Ativação do pistão de baixa pressão	93
6.2.1.3	Fase de Adensamento	94
6.2.1.4	Fase de Cisalhamento	95
6.2.2	Integração	97
6.2.3	Tratamento dos Dados	98
6.2.4	Exportação dos Dados	100
6.2.5	Avisos ao Usuário	100
6.3	Configuração das Células de Carga	102
6.3.1	Atualização do Sistema de Controle	104
6.4	Ensaio de Cisalhamento Direto	106
6.4.1	Preparo da Amostra	106
6.4.2	Configurações Iniciais	107
6.4.3	Fase de Adensamento	109
6.4.4	Fase de Cisalhamento	110
6.4.5	Análise dos Resultados	111
6.5	Teste de Usabilidade	112
6.6	Documentação e Manuais	113
6.6.1	Documentação do Código	113
6.6.2	Manuais	113
6.6.3	Vídeo Demonstrativo	114
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS	117

1 Introdução

Através de uma apropriada investigação geotécnica dos solos, um engenheiro pode reduzir atrasos e prejuízos nos processos de construção. As propriedades físicas dos solos devem ser bem conhecidas a fim de evitar, nas aplicações práticas, problemas com ruptura ou deslizamento (FRATTA; AGUETTANT, 2007).

Neste contexto, existem diferentes maneiras de realizar a caracterização dos solos através de diversos testes laboratoriais. Dentre os tipos de testes laboratoriais encontram-se, por exemplo, os ensaios de resistência ao cisalhamento [(FREDLUNG; WIDGER, 1978) *apud* (BAI; LIU, 2012)] e, como objeto deste trabalho, o ensaio de cisalhamento direto, que é de grande importância para os ramos da Engenharia Civil e da Engenharia de Solos (DAS; SOBHAN, 2018). O ensaio de cisalhamento direto tem por objetivo identificar, através de dados amostrais, o ponto de ruptura do solo em estudo.

Não somente existem diferentes tipos de ensaios e testes, como também há a classificação entre manuais e automáticos. O equipamento em estudo enquadra-se como uma máquina semiautomática para a realização de ensaios de cisalhamento direto. Isto implica a presença de rotinas automáticas de controle e monitoramento dos ensaios, que estão sendo realizadas nesta máquina através de um sistema embarcado, isto é, um sistema dedicado ao funcionamento desse tipo de equipamento, com funcionalidades específicas.

O equipamento original se tratava de uma máquina com a visualização dos dados e as rotinas de controle sendo realizadas por um *software* em computador externo e por controles manuais diretos no equipamento. Houve, porém, uma perda nos dados da memória interna desse equipamento, fazendo com que este caísse em desuso, como é a realidade dos equipamentos laboratoriais de algumas universidades do Brasil (MATTOS et al., 2023).

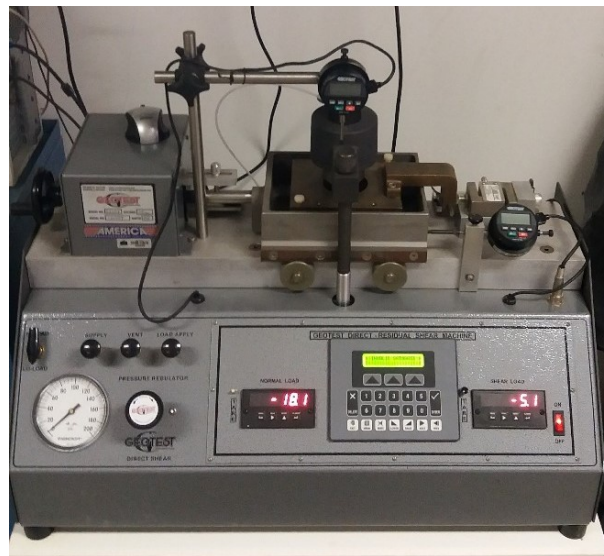
Para a restauração da máquina, dois projetos anteriores de *retrofit* foram realizados na máquina (PEREIRA, 2021) (DOBBIN, 2022). O equipamento no início deste projeto, portanto, estava equipado com um novo sistema eletrônico com suporte para o desenvolvimento de um sistema embarcado dedicado ao monitoramento e ao controle dos comandos envolvidos no ensaio (PEREIRA, 2021) e uma interface visual para a utilização de maneira intuitiva por parte do usuário (DOBBIN, 2022).

Esse sistema embarcado, porém, encontrava-se em um estado de desenvolvimento não finalizado, sem uma integração entre os subsistemas e a interface visual e sem um correto funcionamento do controle de pressão do sistema, necessitando, assim, de uma continuidade no processo de *retrofit* para a otimização desse sistema.

1.1 Justificativa

A identificação do limite de resistência ao cisalhamento na análise de solos é objeto de estudo nas disciplinas e em projetos de pesquisa de alguns cursos de graduação e pós-graduação, como: Engenharia Civil, Engenharia de Transportes, Engenharia de Minas, Geologia e Geotecnia. Para este fim, pode ser utilizada uma Máquina de Cisalhamento Direto-Residual (modelo *S2214A* - GEOTEST) em posse da Universidade de Brasília no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB).

Figura 1 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB - Original



Fonte: (DOBBIN, 2022)

Figura 2 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB - Após primeiros projetos



Fonte: De autoria própria

O equipamento original (Figura 1) utilizava uma tecnologia obsoleta, que continha problemas na manutenção de sua memória, "por utilizar uma bateria não recarregável e uma memória volátil (RAM) para seu armazenamento"(PEREIRA, 2021). Além disso, o sistema pneumático era controlado de forma totalmente manual pelo usuário através de algumas válvulas.

Para melhorar esse panorama, foram desenvolvidos alguns projetos de *retrofit* nesta máquina, um para otimizar o sistema eletrônico, de controle, aquisição e exibição dos dados (PEREIRA, 2021), e outro para a exibição de uma interface para o usuário. Porém, mesmo após esses processos, o equipamento não estava em total funcionamento, devido à necessidade de finalização do sistema embarcado, do sistema de controle e da completa integração entre o *software* de baixo nível e o *software* de alto nível. Foi observada, então, a necessidade de que esse equipamento estivesse funcionando corretamente para aproveitamento nas disciplinas dos cursos mencionados anteriormente. O equipamento inicial pode ser visto na Figura 2.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar o desenvolvimento de um sistema embarcado integrado com o *software* de alto nível (desenvolvido em trabalhos anteriores) para o monitoramento e o controle automático de ensaios de uma máquina de cisalhamento direto que está em processo de *retrofit*.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Desenvolvimento de uma proposta de solução baseada nos requisitos levantados para os subsistemas.
- Integração entre o *software* de baixo nível e o *software* de alto nível.
- Implementação dos algoritmos de baixo nível de monitoramento e controle automático do sistema de pressão.
- Implementação das demais melhorias necessárias identificadas.
- Realização de ensaios completos de cisalhamento direto utilizando a solução desenvolvida.
- Desenvolvimento de documentação e manuais técnicos e para o usuário.

1.4 Metodologia

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica visando o entendimento da importância dos ensaios de cisalhamento direto e dos princípios e conceitos que regem essa ciência.

Após isso, foi feito um estudo intensivo do equipamento de trabalho através da documentação técnica da máquina, de normas técnicas, de pesquisas acadêmicas anteriores (DOBBIN, 2022; PEREIRA, 2021), de pesquisas próprias e de testes empíricos.

Depois da fase inicial de levantamentos teóricos, foram desenvolvidos estudos, pesquisas e testes de soluções passíveis de serem implementadas para o melhor funcionamento do equipamento. Assim, foi feita uma proposta de solução baseada nos resultados preliminares obtidos.

Após a elaboração da proposta, a mesma foi implementada visando atingir o objetivo geral e os objetivos específicos. Com essa solução implementada, foram realizados ensaios de cisalhamento direto completos, para a análise dos resultados e, também, testes de usabilidade para avaliar as funcionalidades do sistema desenvolvido.

1.5 Organização do Trabalho

Para melhor leitura e compreensão, este trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 - *Referencial Teórico*

Apresenta embasamento teórico para o trabalho através do levantamento de conceitos e pesquisas de autores relevantes.

Capítulo 3 - *O Equipamento Original*

Descreve as características originais do equipamento em estudo e o seu funcionamento.

Capítulo 4 - *Desenvolvimentos Iniciais*

Descreve as mudanças implementadas em trabalhos anteriores e o funcionamento do equipamento no início do projeto.

Capítulo 5 - *Proposta de Solução*

Apresenta os resultados preliminares obtidos e os detalhes da proposta de solução para melhorias do equipamento.

Capítulo 6 - *Resultados*

Apresenta os resultados finais obtidos após a implementação da proposta de solução e a realização de ensaios de cisalhamento e dos testes de usabilidade.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo serão apresentados alguns dos principais conceitos envolvidos no projeto, com o fim de embasar cientificamente o trabalho e de esclarecer conceitos e ideias para o leitor. Primeiramente, conceitos referentes ao campo de estudo da máquina como: resistência ao cisalhamento dos solos e ensaio de cisalhamento direto e, posteriormente, conceitos referentes ao campo da engenharia eletrônica como: sistemas embarcados e princípios de controle. Por fim, será apresentado o conceito de *retrofit*.

2.1 Resistência ao Cisalhamento dos Solos

Relevantes problemáticas da engenharia dependem do estudo das propriedades de resistência dos solos e fundações, como a análise de estabilidade em taludes e empuxos de terra sobre estruturas de contenção e sobre túneis (CAPUTO, 1988).

A resistência ao cisalhamento é uma propriedade que diz respeito à capacidade do solo de suportar cargas. Pode ser definida como a tensão cisalhante à que foi submetido o solo no momento da ruptura deste (DAS; SOBHAN, 2018).

Existem duas componentes que definem a resistência ao cisalhamento de um solo: *atrito* e *coesão*. Ambas podem ter uma distinção interna. A primeira entre *atrito físico* e *atrito fictício* e a segunda entre *coesão verdadeira* e *coesão aparente* (CAPUTO, 1988). A física dos solos é a ciência que estuda os diversos fatores das partículas dos solos que influenciam nessas propriedades.

Para o cálculo matemático da resistência ao cisalhamento, um dos critérios mais aceitos academicamente como referência é o Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb.

2.1.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

Mohr (1900), baseando-se dos avanços e estudos de Coulomb (1776), apresentou sua teoria acerca da ruptura de materiais (FRATTA; AGUETTANT, 2007). A relação descrita pelo critério de Mohr-Coulomb pode ser compreendida pela representação das forças envolvidas na Figura 3 e é expressa em termos de:

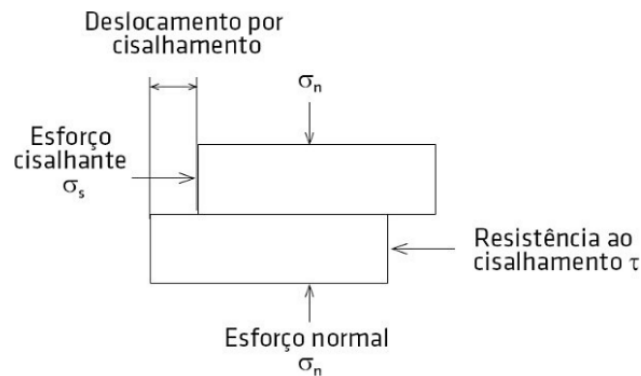
$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.1)$$

onde:

- τ_f = Resistência ao cisalhamento

- c' = Coesão
- σ' = Tensão normal no plano de ruptura
- ϕ' = Ângulo de atrito interno

Figura 3 – Representação das forças atuantes



Fonte: (FIORI, 2015)

Tendo isso em vista, o ensaio de cisalhamento direto tem por objetivo fornecer os dados de deslocamento horizontal e vertical da amostra e das cargas normal e cisalhante, a fim de obter-se os valores reais das variáveis envolvidas no cálculo da resistência ao cisalhamento.

2.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

A resistência ao cisalhamento, geralmente, é mensurada por meio de ensaios laboratoriais. Tais como (CAPUTO, 1988)(DAS; SOBHAN, 2018):

- Ensaio de Cisalhamento Direto
- Ensaio de Cisalhamento Direto Simples
- Ensaio de Compressão Triaxial
- Ensaio Triaxial de Deformação Plana
- Ensaio de Cisalhamento de Torção
- Ensaio de Compressão Simples

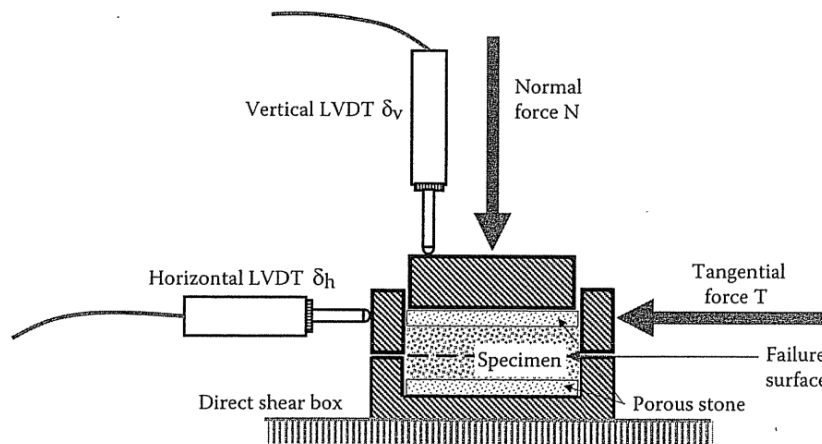
O ensaio de cisalhamento direto é utilizado para "determinar a resistência ao cisalhamento de solos em uma superfície predeterminada"(FRATTA; AGUETTANT, 2007).

Uma outra definição mais específica descreve que esse tipo de ensaio tem o objetivo de:

determinar a tensão de cisalhamento, sob uma tensão normal, capaz de provocar a ruptura da amostra de solo colocada dentro de uma caixa composta de duas partes deslocáveis entre si (CAPUTO, 1988).

Uma amostra de solo cilíndrica ou quadrada é colocada em um compartimento rígido a ser fechado e submetido a uma Tensão normal N e uma tensão cisalhante T , enquanto os deslocamentos vertical e horizontal são monitorados (FRATTA; AGUETTANT, 2007), como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Vista transversal do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: (DAS; SOBHAN, 2018)

É importante ressaltar que os parâmetros de *coesão* e *atrito* não são medidos diretamente, mas sim as variações de carga aplicada e de deslocamento resultante. Os parâmetros são obtidos a partir dessas variações, que serão medidas e armazenadas através do sistema embarcado da máquina.

Existem diferentes tipos de equipamentos que realizam o ensaio de cisalhamento direto como explicado anteriormente. Dentre os principais, podem-se destacar as classificações quanto ao controle e atuação: manual, semi-automática e automática, e quanto à apresentação dos dados: digital, analógica e digital-analógica.

Encontra-se, no mercado, equipamentos com uma mesclagem entre as classificações apresentadas anteriormente, sendo possível, por exemplo, a obtenção de equipamentos que possuam simultaneamente controle manual e automático, como também representação digital e analógica.

2.2.1 Cálculos de Parâmetros

É importante ressaltar os procedimentos de cálculo de alguns parâmetros, que não são necessários nos ensaios de cisalhamento direto e podem ser obtidos por outros ensaios, mas que são relevantes no contexto dos ensaios de solos e que servem de identificação dos dados da amostra, que são apresentados ao usuário através do sistema embarcado do equipamento em estudo. Os parâmetros relevantes ao projeto são (FRATTA; AGUETTANT, 2007):

$$Massa\ Seca\ [g] = \frac{Massa\ Úmida * 100}{100 + \omega} \quad (2.2)$$

$$Massa\ Específica\ Úmida\ [g/cm^3] = \frac{Massa\ Úmida}{Volume} \quad (2.3)$$

$$Massa\ Específica\ Seca\ [g/cm^3] = \frac{Massa\ Seca}{Volume} \quad (2.4)$$

$$Índice\ de\ Vazios = \frac{Volume\ de\ Vazios}{Volume\ dos\ Sólidos} \quad (2.5)$$

$$Saturação\ [%] = \frac{Volume\ de\ Água}{Volume\ dos\ Vazios} \quad (2.6)$$

Onde ω representa a umidade do solo em porcentagem.

Esses parâmetros são calculados no equipamento com as informações da amostra de solo informadas pelo usuário nas configurações iniciais e são informados ao mesmo para uma melhor análise da amostra em estudo.

2.3 Sistemas Embarcados

De acordo com o *Embedded Systems Dictionary* (Dicionário de Sistemas Embarcados), um sistema embarcado pode ser conceituado como uma combinação de hardware e software computacionais, e talvez peças mecânicas adicionais ou outras peças, projetadas para executar uma função dedicada. Em alguns casos, os sistemas embarcados fazem parte de um sistema ou produto maior (GANSSLE; BARR, 1971). São sistemas desenvolvidos para uma tarefa ou uma rotina de tarefas específicas, para atender a alguma necessidade específica.

Existem diversas aplicações para os sistemas embarcados e muitas delas estão presentes no cotidiano da maioria das pessoas. Estão presentes, por exemplo, em eletrodomésticos, em veículos, em telefones, na aviação e em equipamentos de automação residencial.

2.3.1 Microprocessadores e Microcontroladores

Os sistemas embarcados são desenvolvidos em dispositivos chamados de **microprocessadores** e **microcontroladores** (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010).

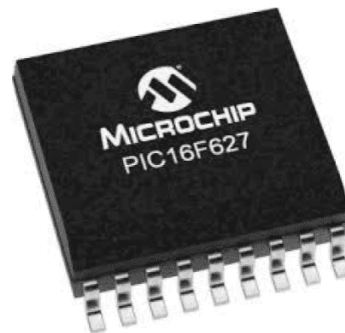
Os microprocessadores são CIs (Circuitos Integrados) contendo CPUs de propósito geral, utilizado para cálculos computacionais e processamento de dados (GANSSE; BARR, 1971)(OLIVEIRA; ANDRADE, 2010). Os microprocessadores necessitam de acoplamento a componentes externos (periféricos) para o cumprimento das aplicações. Observe um exemplo na Figura 5a.

Figura 5 – Exemplos de Microprocessador e Microcontrolador

(a) Microprocessador



(b) Microcontrolador



Fonte: (INDUSTRY, 2023) (EMBARCADOS, 2023)

Os microcontroladores, por sua vez, são semelhantes aos microprocessadores, porém já possuem, em geral, os periféricos necessários para o funcionamento de diversas aplicações em seu *chip* (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010). O seu desenvolvimento é mais específico para o uso em sistemas embarcados. Observe um exemplo na Figura 5b.

É bastante comum, no cotidiano, encontrar placas de desenvolvimento nomeadas de *microcontroladores*, porém o microcontrolador é apenas o *chip* central da placa. O Arduino (ARDUINO, 2023), por exemplo, é uma famosa placa de desenvolvimento de microcontrolador.

2.3.2 Partes de um Sistema Embarcado

Em linhas gerais, os sistemas embarcados são compostos por (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010):

- Memória: existem diversos tipos de memórias, tanto para armazenamento de *software* e de dados de forma permanente quanto para armazenamento temporário de

dados vindos de processamentos.

- **Processador:** é a unidade responsável pelo processamento de dados do sistema.
- **Periféricos Externos:** são estruturas periféricas que podem apresentar diversas funcionalidades importantes para o sistema, como, por exemplo, osciladores, temporizadores, contadores, comunicação serial assíncrona e síncrona, geradores de sinais e circuito de *reset*.
- **Interfaces:** são circuitos de condicionamento dos sinais de entrada e de saída da placa, que permitem a conexão do microcontrolador ou microcoprocessador com outros circuitos.

2.3.3 Tipos de Comunicação

Os sistemas embarcados possuem interfaces de entrada e saída que permitem a interação com dispositivos como sensores e atuadores e a comunicação com outros dispositivos. O princípio básico de comunicação entre dispositivos eletrônicos é o envio e recebimento de *bits*. Para isso, destacam-se os seguintes tipos de comunicação comumente presentes em sistemas embarcados (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010):

- **Comunicação Paralela:** ocorre de forma paralela através de pinos físicos, geralmente transmitindo 8 *bits* (igual a um *byte*).
- **Comunicação Serial:** é o tipo mais comum de transmissão de dados entre computadores e dispositivos embarcados. A comunicação ocorre de maneira serial, como uma fila de *bits*. Nesse tipo de comunicação é possível estabelecer padrões na construção das filas de *bits*, possibilitando a atenuação de erros. Alguns exemplos de barramentos de comunicação serial são: UART, RS-232, I2C, SPI e USB.
- **GPIO (*General Purpose Input/Output Pin*):** são os pinos físicos que permitem a conexão elétrica com sensores e atuadores.

Dentre os tipos de comunicação mencionados acima, os mais utilizados neste trabalho serão a comunicação serial assíncrona e a comunicação através dos pinos GPIO.

2.3.4 Programação em Sistemas Embarcados

Os *softwares* desenvolvidos em sistemas embarcados ou que são apenas armazenados em uma memória interna (como memória EEPROM ou *flash*) são denominados de *firmwares* (GANSSLE; BARR, 1971).

O desenvolvimento de *firmware* para sistemas embarcados pode ser realizado em diversas linguagens de programação. Entre elas, destacam-se as mais utilizadas (BAILEY,

2005), estruturadas na Tabela 1 de acordo com o nível (quanto mais baixo, mais próximo à linguagem da máquina e quanto mais alto, mais próximo à linguagem humana).

Tabela 1 – Linguagens de programação para sistemas embarcados

Linguagem	Nível
Assembly	Baixo
C	Alto
C+	Alto
Java	Alto
Python	Alto

Fonte: De autoria própria

Um dos benefícios da programação em sistemas embarcados é a sua robustez para operação de rotinas que exigem aplicações em tempo real. Através dos RTOS, de temporizadores e de interrupções, por exemplo, um sistema embarcado pode garantir o funcionamento em tempo real das tarefas.

2.4 Princípios de Controle

É possível identificar sistemas de controle em diversas esferas da sociedade. Diversas aplicações são conhecidas, como, por exemplo, o controle de temperatura de um forno elétrico ou de um ar condicionado e o funcionamento de eletrodomésticos automatizados.

Os sistemas de controle não estão presentes apenas em equipamentos eletrônicos. Até mesmo a natureza apresenta sistemas naturais de controle. O controle dos níveis de açúcar e outras substâncias no corpo humano e o controle de temperatura corporal para combater uma infecção ou outros agentes nocivos para o corpo humano são ótimos exemplos de como a natureza apresenta alguns fenômenos em que os princípios de controle são percebidos (NISE, 2013).

Para uma melhor compreensão sobre os sistemas de controle, é importante entender os conceitos de **Variável Controlada**, que pode ser definida como a quantidade ou a condição que é medida ou controlada, de **Variável ou Sinal de Controle**, a qual é a condição ou quantidade variada pelo controlador para haver uma alteração no valor da variável controlada, de **Setpoint** (Valor-alvo), o valor de referência da variável controlada a ser mantido, de **Distúrbio**, um sinal que tende a afetar o valor da saída de um sistema de forma negativa (pode ser interno ou externo) e de **Erro de Controle**, que corresponde ao valor numérico da diferença entre o valor real medido e ao valor ideal (OGATA, 2010). Portanto, Nise define um **Sistema de Controle** como:

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada (NISE, 2013).

Um sistema de controle pode ser representado através da representação em diagrama de blocos e pode ser descrito como um sistema que é excitado quando detecta uma *entrada*, possui um processo interno que realiza a manipulação desse sinal de entrada (*sistema de controle*), a atenuação de interferências por perturbações no sistema e obtém uma resposta na *saída* controlada. A partir de relações entre as entradas e saídas, o comportamento de um sistema de controle pode ser compreendido.

Os sistemas de controle são desenvolvidos por diversas razões, como: amplificação de potência, controle remoto, conveniência da forma da entrada, compensação de perturbações (NISE, 2013). Neste trabalho, a utilização de um sistema de controle é necessária para a realização do controle automático da pressão incidente sobre a amostra no ensaio de cisalhamento, para que a mesma esteja dentro dos limites estabelecidos pela norma internacional D3080 (ASTM, 2011) e há também uma outra malha de controle original, que está implementada e funcionando corretamente, no servomotor da máquina, o que garante a velocidade e a movimentação de cisalhamento.

2.4.1 Tipos de Configurações de Sistemas de Controle

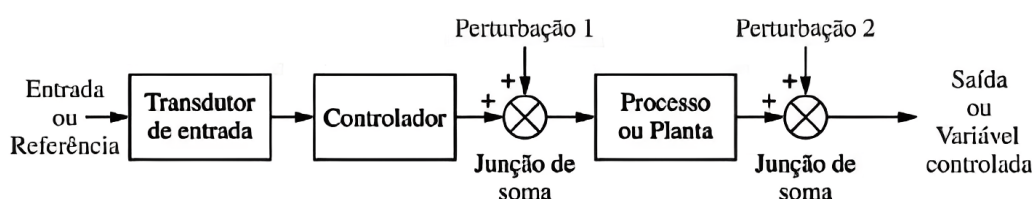
Nesta seção serão apresentadas as principais configurações de sistemas de controle conhecidas: **Sistemas em Malha Aberta** e **Sistemas em Malha Fechada**.

2.4.1.1 Sistemas em Malha Aberta

São os sistemas nos quais a saída não tem efeito sobre a ação de controle. Em outras palavras, a saída não é monitorada nem funciona como realimentação para a entrada (OGATA, 2010).

Um sistema de malha aberta não efetua correções a partir das perturbações que podem ter efeito no sistema, são comandados simplesmente pela entrada e pelo funcionamento do controlador (NISE, 2013). O diagrama de blocos simplificado desse tipo de configuração segue o modelo da Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta



Fonte: (NISE, 2013)

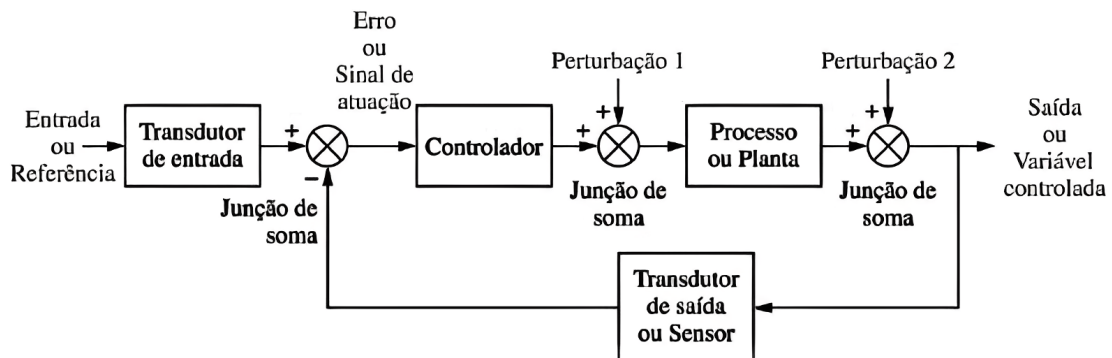
2.4.1.2 Sistemas em Malha Fechada

Os sistemas em malha fechada corrigem algumas das desvantagens dos sistemas em malha aberta. Eles possuem sensibilidade às perturbações inseridas no sistema e realimentação para corrigi-las (NISE, 2013).

Um exemplo de sistema com realimentação (ou *feedback*) é o sistema de regulagem de temperatura de um ar condicionado. O usuário define o *setpoint* (valor-alvo ou ponto de ajuste), que é o valor esperado, e o sistema, geralmente, possui um valor de **histerese**, que corresponde ao valor permitido de defasagem na resposta após uma variação na entrada (GANSSE; BARR, 1971). Após definidos os valores de referência, o sistema de controle em malha fechada consegue monitorar a temperatura atual do ambiente, comparar com a temperatura anterior e, assim, se aproximar do valor de *setpoint* (OGATA, 2010).

O diagrama de blocos simplificado desse tipo de configuração segue o modelo da Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada



Fonte: (NISE, 2013)

No diagrama de blocos acima é possível identificar a realimentação observando que a *saída* (ou variável controlada) é inserida novamente na entrada do sistema, onde sua variação em relação ao *setpoint* e à *entrada* será corrigida.

Por ser uma configuração na qual há o monitoramento do sinal de saída, seria útil no controle de carga do sistema pneumático da máquina de cisalhamento direto, pois proporcionaria a diminuição do erro de controle, adequando melhor o sistema à norma internacional D3080 (ASTM, 2011).

2.4.2 Controle *On-Off*

O controle *On-Off* ou controle de duas posições é utilizado em sistemas em que só existem duas posições fixas para o controle, geralmente *on* (ligado) e *off* (desligado). Por

ser um tipo de controle simples e barato, é muito utilizado em diversas aplicações.

Segundo [OGATA \(2010\)](#):

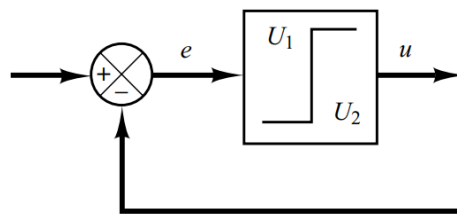
Os controladores de duas posições são geralmente dispositivos elétricos, e a válvula elétrica solenóide é amplamente utilizada em tais controladores. Controladores proporcionais pneumáticos com ganhos muito altos atuam como controladores de duas posições e às vezes são chamados de controladores pneumáticos de duas posições.

Sendo o sinal de saída $u(t)$ e o erro de controle $e(t)$, em um controlador *on-off*, o objetivo é manter a variável controlada dentro dos valores máximo e mínimo permitidos, então, para U_1 e U_2 constantes ([OGATA, 2010](#)):

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{se } e(t) > 0, \\ U_2, & \text{se } e(t) < 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

Na Figura 8 está representado o diagrama de blocos do controlador *on-off* ou controlador de duas posições.

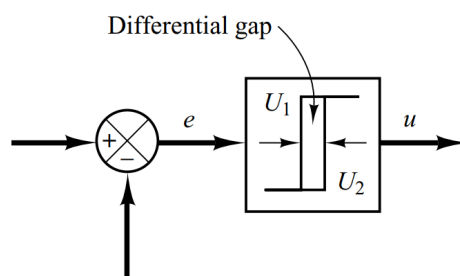
Figura 8 – Diagrama de blocos de um controlador *on-off*



Fonte: ([OGATA, 2010](#))

O intervalo entre o instante em que a mudança de estado deve ocorrer e o instante que ela realmente ocorre é chamado de *differential gap* (ou histerese), como mostra a Figura 9.

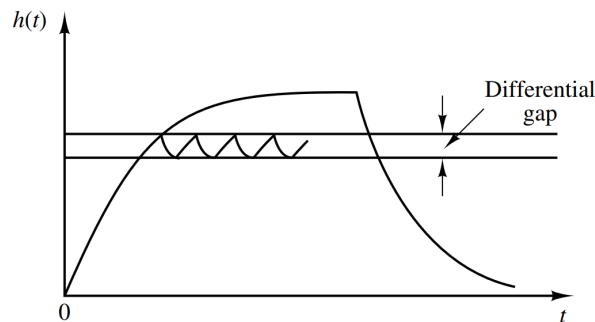
Figura 9 – Diagrama de blocos de um controlador *on-off* com histerese



Fonte: ([OGATA, 2010](#))

Ao observar a Figura 10, é possível perceber que, quanto menor a histerese, menor será a oscilação do sinal de saída, porém será maior no número de acionamentos do componente elétrico que realiza o controle, podendo causar a diminuição da sua vida útil (OGATA, 2010).

Figura 10 – Curva representativa de um controlador *on-off*



Fonte: (OGATA, 2010)

Esse tipo de controlador, por ser comumente utilizado em sistemas que utilizam válvulas elétricas solenóides, é o mais simples de ser implementado no sistema pneumático da máquina de cisalhamento, porém apresenta a problemática apresentada no parágrafo anterior: quanto menor é a histerese, maior será o número de acionamentos e, consequentemente, menor será a vida útil das válvulas.

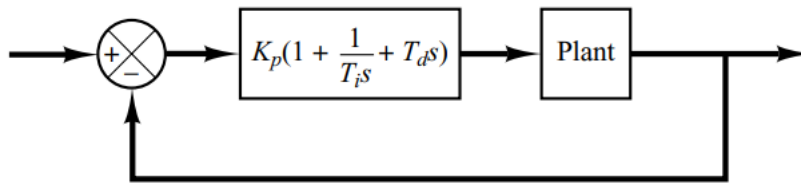
2.4.3 Controle PID

O controlador **PID (Proporcional, Integral e Derivativo)** combina os princípios de atuação de dois tipos de controladores: o proporcional integral e o proporcional derivativo. São estes (NISE, 2013):

- **Controlador Proporcional Derivativo (PD):** controlador que adiciona um valor proporcional à derivada do sinal ao sistema para otimizar a sua resposta transitória.
- **Controlador Proporcional Integral (PI):** controlador que adiciona um valor proporcional à integral do sinal ao sistema para otimizar o seu erro em regime permanente.

Mais da metade dos controladores industriais utilizados são PID, pois possuem uma gama de aplicações bem ampla e aplicável para a maioria dos sistemas de controle e podem ser implementados computacionalmente (OGATA, 2010). A ideia de um controlador PID é melhorar a resposta transitória do sistema e, então, reduzir o erro em regime permanente.

Figura 11 – Diagrama de blocos de exemplo do controlador PID



Fonte: (OGATA, 2010)

Pela Figura 11, pode ser vista a relação entre a função de transferência e a planta do sistema de controle. Os parâmetros K_p , T_i e T_d podem ser definidos de acordo com as regras de controle de Ziegler–Nichols (OGATA, 2010).

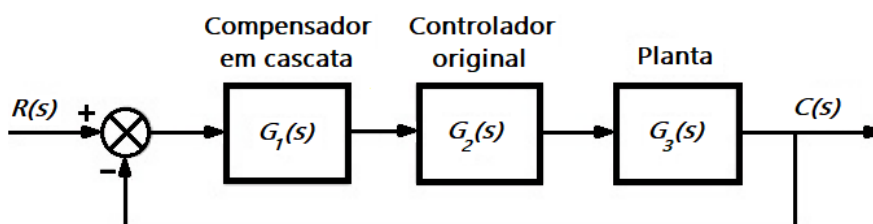
O controle PID pode ser utilizado, por exemplo, no controle de sistemas em que o número de estados possíveis de serem acionados é definido dentro de uma faixa de valores. Este é o caso das válvulas pneumáticas proporcionais, nas quais o controle *on-off* pode ser insuficiente. Para essas válvulas torna-se melhor a implementação de um controlador PID que reduza o erro de controle em regime permanente.

2.4.4 Controle em Cascata

Um sistema de controle em forma de cascata é uma estrutura utilizada para otimizar o desempenho de sistemas de controle. Nesse formato, o sistema é dividido em dois ou mais estágios de controle, cada um com seu próprio controlador, sendo chamados: estágio primário e estágios secundários. Essa montagem proporciona um controle mais preciso do sistema, uma vez que cada controlador pode ser implementado de forma específica (NISE, 2013).

Na forma em cascata, o controlador primário (ou original) ajusta uma variável para atingir um *setpoint* desejado. O controlador secundário, conseqüentemente, é responsável por fornecer um estágio de controle adequado ao controlador primário. Essa abordagem é útil em sistemas que trabalham com diferentes variáveis ou estágios de controle por sua capacidade de resposta em aplicações com configurações variadas (NISE, 2013). A Figura

Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em cascata



Fonte: (NISE, 2013)

12 exemplifica um sistema de controle em cascata através da representação por diagrama de blocos. Nessa figura é possível identificar a presença de três estágios de controle que estão interligados em cascata e que, assim, compõem o sistema de controle geral.

2.5 Retrofit

Segundo o Dicionário de Meio Ambiente e Conservação de Oxford, *retrofit* é o ato de adicionar maquinário ou equipamentos a um sistema existente, com o fim de corrigir um defeito ou adicionar capacidade (PARK; ALLABY, 2013).

Em meio a constantes avanços e pesquisas tecnológicas, os equipamentos tornam-se cada vez mais rapidamente obsoletos e insuficientes. Nesse contexto, insere-se o conceito de *retrofit* (reequipar ou reequipamento), cujo objetivo é renovar e melhorar o funcionamento e as funcionalidades de um sistema, através de novas técnicas e tecnologias.

Neste trabalho, o *retrofit* foi aplicado a uma máquina de cisalhamento direto que, embora seja um equipamento de ótima qualidade, não conta com suporte do fabricante e necessitava da implementação de novas funções.

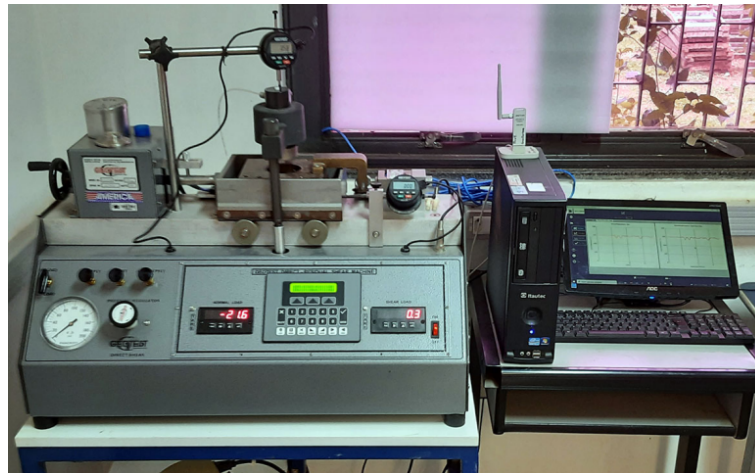
3 O Equipamento Original

Neste capítulo serão apresentadas as características principais do equipamento em estudo em seu estado original. Para isso, serão apresentados: o Funcionamento do Equipamento Original, o Sistema Eletrônico Original, o Sistema de *Software* Original, o Sistema Pneumático Original e o Estado do Equipamento Original.

3.1 Funcionamento do Equipamento Original

O equipamento original tratava-se de uma Máquina de Cisalhamento Direto de modelo GEOTEST Direct-Residual Shear Machine S2215A da marca GEOTEST (GEOTEST, 2002). Como pode ser visto na Figura 13, a máquina necessitava da utilização de um *software* em um computador externo para a realização de experimentos.

Figura 13 – Máquina de cisalhamento direto do INFRALAB na UnB completa - Original



Fonte: (PEREIRA, 2021)

A máquina tinha por objetivo a realização de ensaios de cisalhamento direto de solos. A sequência de operação se inicia com a inserção de uma amostra de solo, e então, o ensaio se dá em duas fases. A primeira, de *adensamento*, na qual é definida e inserida uma pressão sobre a amostra, a fim de representar uma carga normal fixa sobre ela. A segunda fase, de *cisalhamento*, consiste na aplicação de uma tensão de cisalhamento na horizontal sobre a amostra através do deslocamento de um carrinho no qual ela está fixada.

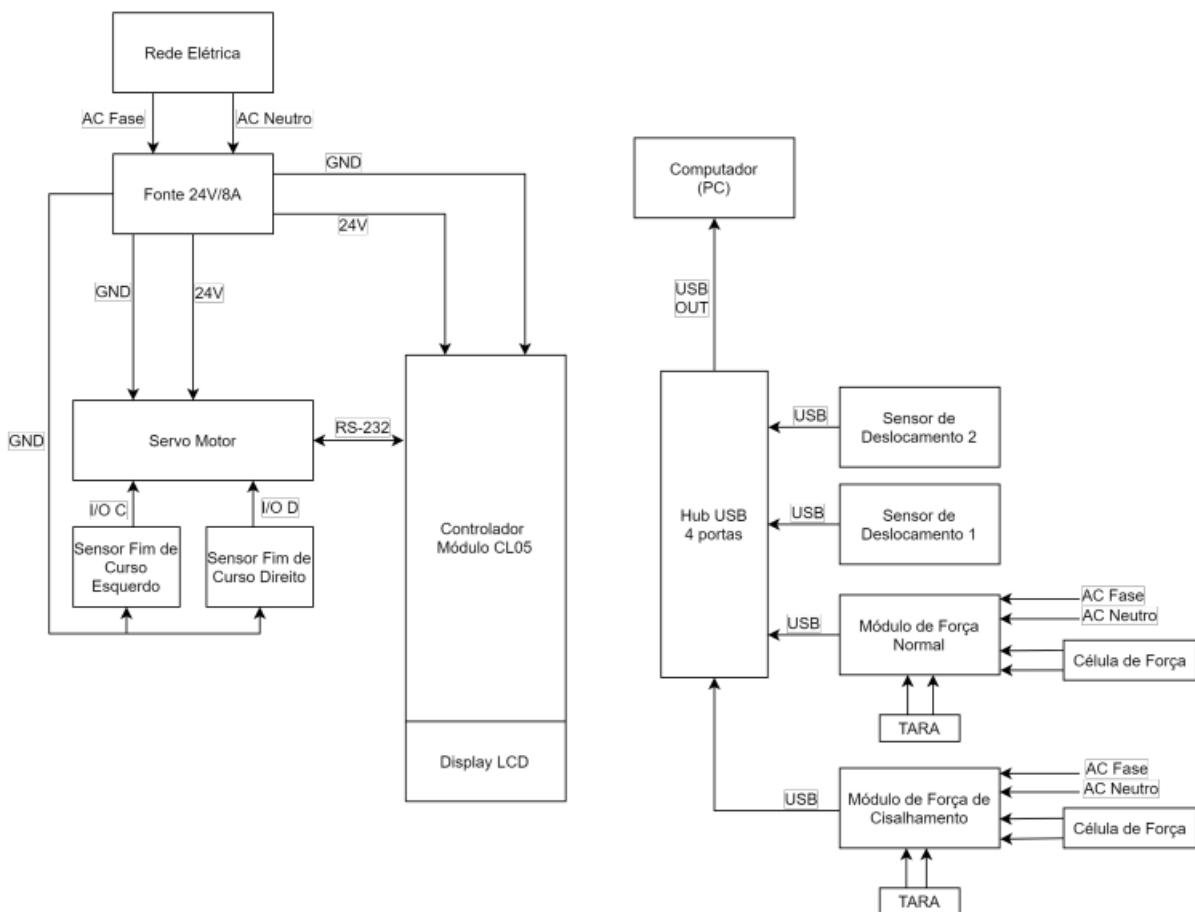
Em ambas as fases mencionadas, são medidos os deslocamentos e as cargas, tanto na horizontal, quanto na vertical, e são controlados a pressão sobre a amostra e o acionamento do motor para o deslocamento do carrinho.

O equipamento contava com três principais sistemas: *Sistema Eletrônico*, *Sistema Pneumático* e *Sistema de Software* na sua operação. Nas próximas seções serão apresentadas as características gerais desses sistemas.

3.2 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico do equipamento original (esquemático na Figura 14) contava com uma fonte de alimentação, com alguns sensores, sendo eles: dois sensores de deslocamento e duas células de carga (para a obtenção das medidas de força e deslocamento durante os ensaios), com um controlador com uma pequena tela e alguns botões para a definição e configuração de alguns parâmetros e, por fim, com um servo motor para a realização do movimento de cisalhamento, juntamente com dois sensores de fim de curso de segurança (GEOTEST, 2002). Além disso, todos os dados dos sensores eram comunicados ao computador externo através de portas USB e manipulados pelo Sistema de *Software*.

Figura 14 – Diagrama elétrico do equipamento original



Fonte: (PEREIRA, 2021)

3.2.1 Sensor de Deslocamento

Os sensores de deslocamento vertical e horizontal utilizados são do modelo Logic Basic BG2110 do fabricante CDI - Chicago. A comunicação com o computador externo era feita por meio de um cabo USB. O sensor pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Sensor de deslocamento



Fonte: De autoria própria

O equipamento possui dois sensores de deslocamento iguais que enviam os dados referentes à variação de distância percebida, pelo modo de medição incremental. As variações correspondem ao deslocamento horizontal do carrinho da máquina, referente aos dados relevantes à fase de cisalhamento, e ao deslocamento vertical da amostra, referente aos dados relevantes à fase de adensamento.

O recebimento dos dados dos dois sensores ocorre quando há o envio de um sinal de *REQUEST* (requisição). Isso se dá pela transição do nível lógico do pino de requisição do sensor de *HIGH* (nível lógico alto) para *LOW* (nível lógico baixo) (CDI, 1998). Os dados da medição, então, são enviados e também são apresentados a todo momento no *display* do próprio sensor.

Os dados referentes à resolução e à precisão do sensor podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Capacidade do sensor de deslocamento

	Polegadas ["]	Milímetros [mm]
Resolução	0,0001	0,002
Intervalo	0,06 - 1	1,5 - 25,4

Fonte: (CDI, 2006)

Os dados recebidos através da comunicação serial, compostos por 14 caracteres ASCII, seguem o seguinte padrão definido pelo fabricante (CDI, 1998):

- Caractere 1 (caractere de validação):
 - '>' - indica uma medição válida.
 - 'H' - indica que a leitura ultrapassou o limite máximo de tolerância.
 - 'L' - indica que a leitura ultrapassou o limite mínimo de tolerância.
 - 'X' - indica erro de medição.
 - 'P' - indica que o sensor está configurado no modo de não-medição.
- Caractere 2 (caractere de sinal):
 - '-' - indica um valor negativo.
 - ' ' - (espaço) indica uma medição positiva.
- Caracteres 3 a 9 (caractere de dígitos/decimais):
 - Para polegadas: 'n.nnn' - com 'n' de 0 a 9.
 - Para milímetros: 'nn.nnn' - com 'n' de 0 a 9.
- Caractere 10 é sempre ','.
- Caracteres 11 e 12 (campo de unidades):
 - 'IN' - para Sistema Inglês.
 - 'MM' - para Sistema Internacional.
- Caracteres 13 e 14 são sempre 'CR' - Retorno de carro (*Carriage Return*).

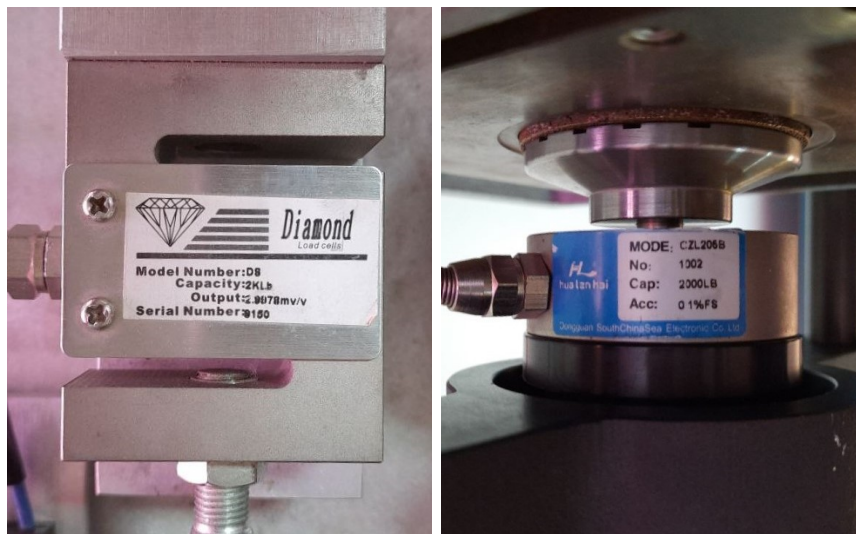
3.2.2 Célula de Carga

São utilizadas, na máquina de cisalhamento, duas células de carga para a medição de força, tanto no sentido vertical (fase de adensamento), quanto no sentido horizontal (fase de cisalhamento). Para a medição na horizontal é utilizada uma célula de carga de modelo D2-2K-SS do fabricante Diamond, com capacidade de 2.000 lb, ou seja, aproximadamente 907,2 kg. Para a medição a vertical é utilizada uma célula de carga de modelo CZL206B, também com capacidade de 2.000 lb. Os modelos citados podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16 – Células de carga

(a) Modelo DS-2K-SS

(b) Modelo CZL206B



Fonte: De autoria própria

Os valores obtidos nas células de carga são exibidos em painéis digitais DIN, através de um cabo USB, por meio de conexão serial, com *baudrate* de 9600, 8 bits de dados e 1 bit de parada (PEREIRA, 2021) (LAUREL, 2022). A Figura 17 apresenta o modelo de painel utilizado.

Figura 17 – Painel Digital DIN



Fonte: (LAUREL, 2022)

Os comandos enviados para os sensores de carga seguem um formato mínimo de 4 caracteres, exemplo: "*5A1". Todos os comandos se iniciam com '*' seguido pelo endereço do contador, depois uma letra de comando seguida por um número ou letra de sub-comando. O comando para obter uma leitura é o comando "*1B1" (LAUREL, 2021).

Os dados enviados pela célula de carga, formando 11 caracteres ASCII, seguem o seguinte padrão (LAUREL, 2021):

- Caractere 1: '*' - identificador de comando.

- Caractere 2: endereço do dispositivo.
- Caractere 3: letra do comando.
- Caractere 4: sinal do valor - '+' para positivo e '-' para negativo.
- Caracteres 5 a 9: dígitos de 0 a 9 correspondentes ao valor.
- Caractere 10: '*' - ponto decimal.
- Caractere 11: indicador de alarme ou *overload* (sobrecarga) - de 'A' a 'H'.

3.2.3 Servo Motor

É utilizado, na máquina, para a fase de cisalhamento propriamente dito do ensaio, um servo motor de modelo SM2337DT do fabricante Smart Motor (Figura 18). O servo motor possui as seguintes especificações:

Tabela 3 – Especificações do servo motor

Servo Motor - SM2337DT	
Alimentação	24 V
Velocidade Máx.	3.800 RPM
Resolução do Encoder	2000
Torque Contínuo	3.688 in-lb
Interface	RS-232

Fonte: ([ANIMATICS, 2002](#))

Figura 18 – Servo Motor SM2337DT



Fonte: ([ANIMATICS, 2002](#))

O servo motor é utilizado em conjunto com um sistema de engrenagens de forma que o acionamento do servo corresponda à aplicação de uma tensão de cisalhamento na amostra.

O controle do motor era realizado pela comunicação através da interface RS-232 com um controlador CL-05. O manual do usuário (ANIMATICS, 2002) apresenta diversos modos de operação possíveis, dentre eles, os utilizados no ensaio de cisalhamento são: Modo de Posição e Modo de Velocidade.

3.2.3.1 Modo de Posição

Este modo é responsável pela ativação do movimento do motor para alcançar a posição definida pelo usuário, baseado na resolução do encoder. São enviados para o motor, a título de exemplo, os seguintes comandos (ANIMATICS, 2002):

MP (define o modo de posição)

O=0 (define a posição atual como a origem)

A=100 (define a aceleração)

V=32212 (define a velocidade)

P=2000 (define a posição final)

G (inicia o movimento)

3.2.3.2 Modo de Velocidade

Este modo é utilizado quando é desejado o movimento com uma velocidade constante. Os valores de velocidade positivos correspondem ao movimento no sentido horário e os valores negativos ao sentido anti-horário.

Para um encoder de 2000 pulsos são utilizadas as seguintes fórmulas para se obter o parâmetro de velocidade a ser enviado:

$$V = (RPS)(32212.578), \quad (3.1)$$

$$V = (RPM)(536.87633), \quad (3.2)$$

onde as constantes 32212.578 e 536.87633 correspondem ao número de rotações do encoder.

São enviados para o motor, a título de exemplo, os seguintes comandos (ANIMATICS, 2002):

MV (define o modo de velocidade)

A=80 (define a aceleração)

V=32212*5 (define a velocidade)

G (inicia o movimento)

3.3 Sistema de *Software*

O *software* original do equipamento era responsável por receber os dados adquiridos pelos sensores e exibí-los para o usuário através de uma interface gráfica em um computador externo. Esse *software* possuía três principais funcionalidades: a configuração de parâmetros iniciais da amostra, o monitoramento da fase de adensamento e o monitoramento da fase de cisalhamento. Na Figura 19 é possível ver a primeira tela do programa, que permitia a configuração de alguns parâmetros.

Figura 19 – Tela do *software* original da máquina

The screenshot shows the 'Geotest Direct-Residual Shear D3080 Ver. 1.0.29' software interface. It features a menu bar with 'File', 'Setup', 'Connections', 'Consolidation', 'Shear Test', and 'Finish Test'. The main area is divided into several input sections:

- File Info:** Includes fields for 'Testing Agency', 'Company Name', 'Address', 'City, State Zip', 'Equipment' (Geotest S2215 - Direct Residual Shear), 'Shear Box W., mm.' (2,500), 'Shear Box Type' (Round), 'Determine Method' (Assumed), 'Shear Box HT., mm.' (2,00), 'Base Plate Thick., mm.' (0,2400), 'Por Stone Thick., mm.' (0,2500), and 'Grid Plate Thick., mm.' (0,2500). A 'Save [File Info] for future files' button is located below these fields.
- Test Info:** Includes fields for 'Sample ID', 'Sample Loc.', 'Boring No.', 'Sample Depth', 'Sample Desc.', 'Test Type' (Direct Shear), 'Tested By', and 'Test Date'. It also has dropdown menus for 'Specimen Type' (Undisturbed) and 'Test Type'. Other fields include 'SPGR Solids' (2,65), 'Plastic Limit', 'Liquid Limit', 'Plasticity Index', 'USCS Class', and 'AASHTO Class'.
- Initial Condition of Specimen:** Includes fields for 'Initial Height, mm.' (1,48), 'Wet Weight, g' (200), 'Moisture, %' (8,8), 'Volume, cc', 'Area, sq.cm.', 'Wet Density, Kg/m³', 'Dry Density, Kg/m³', '% Volume of Solids', 'Void Ratio', and 'Saturation'.
- Client Info:** Includes fields for 'Client', 'Project', and 'Project ID'.

A 'Calculate' button is located at the bottom right of the 'Initial Condition of Specimen' section. A note states 'Yellow indicates required entries.' The 'Next >>' button is at the bottom left.

Fonte: (GEOTEST, 2002)

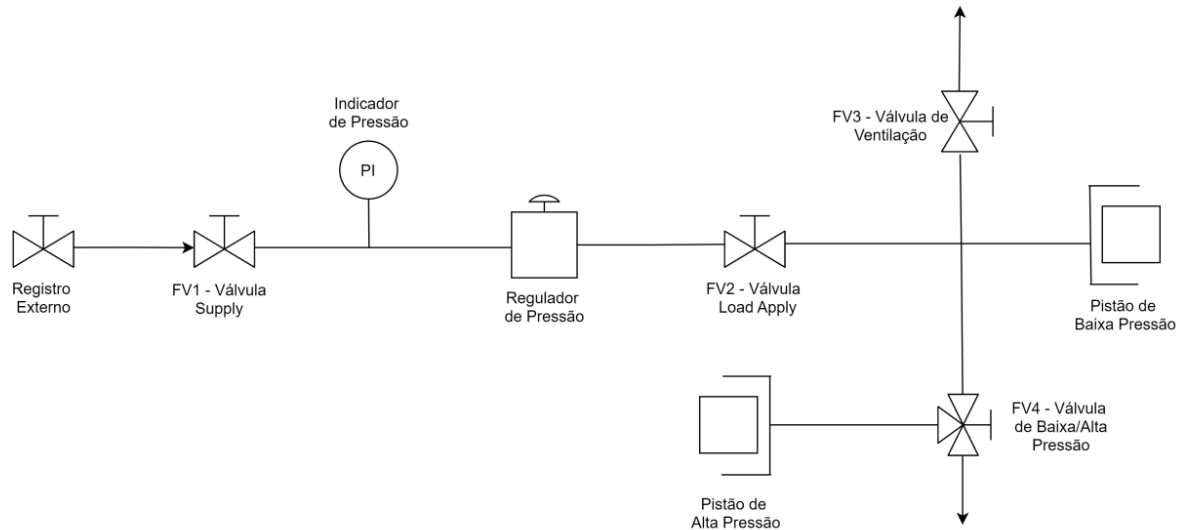
3.4 Sistema Pneumático

O sistema pneumático é o sistema da máquina responsável por realizar a aplicação da carga normal na amostra para a realização da consolidação da amostra na fase de adensamento do ensaio.

O sistema original da máquina seguia o funcionamento do esquemático na Figura 20 e era controlado de forma totalmente manual, por intermédio de reguladores e válvulas para a definição da carga. A carga controlada por essas válvulas era aplicada por pressão de ar comprimido através de dois pistões pneumáticos e uma série de tubos e conexões. Ao todo eram quatro válvulas, um regulador, um registro externo, um indicador de pressão

e dois pistões.

Figura 20 – Esquemático do Sistema Pneumático original



Fonte: (GEOTEST, 2002)

3.5 Estado do Equipamento Original

O equipamento estava em uso no Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília (INFRALAB) para a realização de ensaios de cisalhamento direto para análise de solos. Após anos de uso, a máquina caiu em desuso por conta de sua tecnologia obsoleta e pela perda dos dados de sua memória volátil.

Por isso, fez-se necessário o desenvolvimento de alguns projetos para a reativação do equipamento. Esse desenvolvimento será apresentado no capítulo a seguir.

4 Desenvolvidimentos Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor o funcionamento do equipamento, as suas características gerais, as especificações técnicas dos componentes que o compõem, as tecnologias utilizadas na máquina e a interface em *software* de alto nível, presentes no equipamento após o desenvolvimento das mudanças implementadas antes da execução deste projeto (PEREIRA, 2021) (DOBBIN, 2022).

4.1 Características Gerais

O equipamento original, descrito no Capítulo 3, passou, recentemente, por um processo de *retrofit*, realizado por Mateus Felipe Massa Pereira em um projeto de graduação do curso de Engenharia Eletrônica pela UnB (PEREIRA, 2021) e por Ivan Diniz Dobbin em um projeto de graduação do curso de Engenharia de *Software* pela UnB (DOBBIN, 2022), então não é composto pelos componentes de processamento, controle, alimentação e atuação originais. O equipamento no momento deste projeto conta com alguns sistemas e subsistemas que serão apresentados a seguir.

Inicialmente, a máquina apresenta dois grandes sistemas: eletrônico e pneumático. Além dessa divisão, também apresenta as seguintes especificações por subsistema (PEREIRA, 2021):

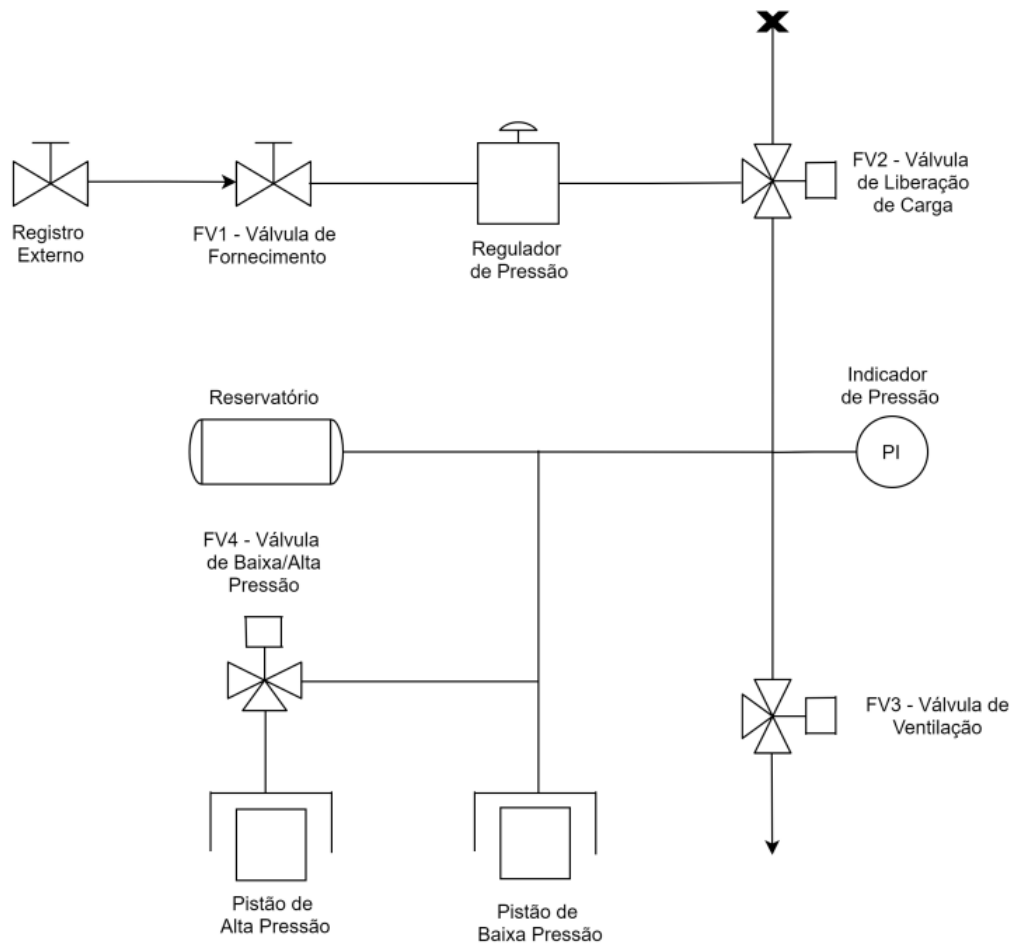
- Subsistema de Alimentação: funciona com alimentação AC de 220V.
- Subsistema de Atuação: possui um *buzzer* passivo para indicações ao usuário e um servo motor, pistões de pressão e três válvulas solenoides para os controles mecânicos.
- Subsistema de Controle: possui uma *Raspberry Pi 4B* como unidade de processamento, um *display touchscreen* de 7 polegadas e uma interface para o usuário (DOBBIN, 2022). Conta também com o sistema de atuação e de medição.
- Subsistema de Medição: possui sensores de deslocamento e células de carga.

Essa máquina passou por um processo de otimização e de melhorias a fim de potencializar o seu funcionamento e a integração de todos os seus sistemas, que serão apresentados a seguir.

4.1.1 Sistema Pneumático

O sistema pneumático é a parte da máquina responsável pelo acionamento dos pistões de baixa e de alta pressão que atuam na fase de adensamento, fixando a amostra verticalmente. Esse sistema obedecia, após os desenvolvimentos iniciais, o diagrama de funcionamento da Figura 21.

Figura 21 – Diagrama do Sistema Pneumático após os desenvolvimentos iniciais



Fonte: (PEREIRA, 2021)

Como pode ser visto na Figura 21, esse sistema é composto pelos seguintes componentes:

- Válvula de fornecimento: controla a entrada de ar comprimido no sistema por fontes externas.
- Regulador de pressão: regula a pressão de entrada no sistema.
- Indicador de pressão: exibe a pressão atual na máquina após ter sido regulada.

- Válvula de liberação de carga (V1): é a primeira válvula (solenoide) controlada eletricamente, funcionando como o ponto de suprimento do sistema, possível de ser controlado pelo sistema embarcado de controle.
- Válvula de ventilação (V2): é a válvula (solenoide) de liberação de ar. Funciona normalmente fechada e, quando acionada, realiza a liberação da pressão.
- Válvula de baixa/alta pressão (V3): é a válvula (solenoide) que controla a liberação de ar para o pistão de alta pressão.
- Pistão de baixa pressão: pistão ativado por pressão para o adensamento da amostra pela parte superior da mesma.
- Pistão de alta pressão: pistão ativado por pressão para o adensamento da amostra pela parte inferior da mesma.
- Reservatório de ar: tanque de armazenamento de ar para auxílio no controle automático.

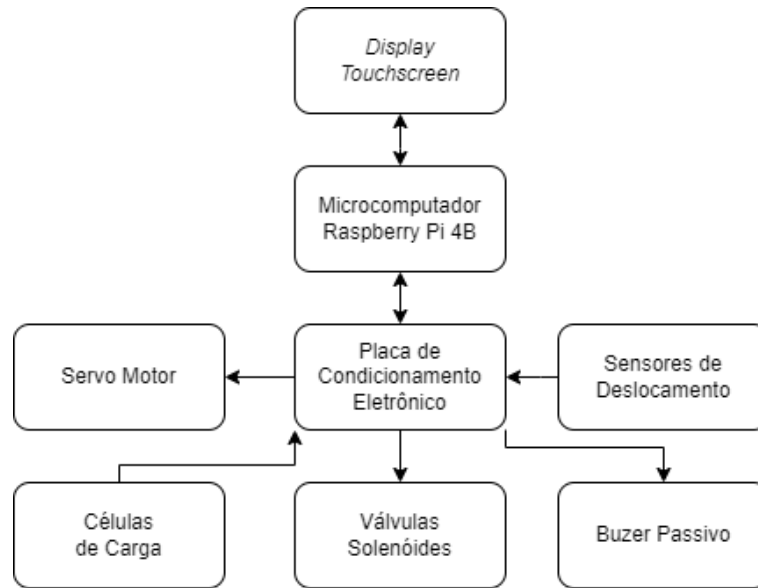
Dos componentes mencionados acima, são controlados diretamente pelo sistema de controle eletrônico apenas as três válvulas V1, V2 e V3, que terão seu funcionamento apresentado na Seção 4.2.5.

4.1.2 Sistema Eletrônico

Por se tratar de uma máquina semiautomática, tanto o controle, quanto a ativação de todos os sensores e atuadores é realizada de forma eletrônica. Tendo isso em vista, o sistema eletrônico é a parte responsável por realizar o controle dos atuadores, a leitura dos sensores, o processamento de dados e a interação com o usuário. O funcionamento desse sistema pode ser entendido a partir da Figura 22.

Pelo diagrama da Figura 22 é possível identificar que a unidade de processamento é uma *Raspberry Pi 4B*, que, com o auxílio de uma placa desenvolvida de condicionamento eletrônico, realiza todas as comunicações necessárias com os demais componentes.

Figura 22 – Diagrama inicial de funcionamento do sistema eletrônico



Fonte: De autoria própria

4.2 Componentes Utilizados

Nesta seção, serão apresentados os principais componentes utilizados no funcionamento do equipamento em estudo, juntamente a suas especificações técnicas, explicações sobre o seu funcionamento e as mudanças realizadas em relação ao equipamento original.

4.2.1 Raspberry Pi 4B

A *Raspberry Pi* é o componente utilizado como unidade de processamento da máquina de cisalhamento. A *Raspberry Pi* é um pequeno computador de placa única fabricado pela empresa *Raspberry Pi Foundation*.

Figura 23 – *Raspberry Pi 4B*

Fonte: (RASPBERRYPI, 2023)

Esse computador, apesar de pequeno, é bem robusto e atende bem a muitas aplicações do dia a dia da maioria das pessoas, como: navegar na *web*, manipular dados e editar arquivos (RASPBerryPI, 2023). Além disso, seu uso tem sido amplamente difundido no desenvolvimento de sistemas embarcados. No equipamento em estudo está sendo utilizado o modelo *Raspberry Pi 4B*, que pode ser visto na Figura 23.

O modelo em uso, conta com as seguintes especificações de *hardware*, interfaces e *software*, respectivamente, informadas pelo fabricante (RASPBerryPI, 2019):

Tabela 4 – Especificações de *Hardware - Raspberry Pi 4B*

Especificações de <i>Hardware</i>
Quad core ARM-Cortex A72 de 64 bits rodando a 1,5GHz
4 GB LPDDR4 opções de RAM
Decodificação de <i>hardware</i> H.265 (HEVC) (até 4Kp60)
Decodificação de <i>hardware</i> H.264 (até 1080p60)
<i>VídeoCore</i> VI Gráficos 3D
Suporta saída de <i>display dual</i> HDMI de até 4Kp60

Fonte: (RASPBerryPI, 2019)

Tabela 5 – Especificações de Interfaces - *Raspberry Pi 4B*

Especificações de Interfaces
802.11 b/g/n/ac <i>Wireless</i> LAN
Bluetooth 5.0 com BLE
1x porta Cartão SD
2x portas micro-HDMI que suportam <i>displays</i> duplos de até 4Kp60 de resolução
2x portas USB2
2x portas USB3
1x porta Gigabit Ethernet (suporta PoE com PoE HAT adicional)
1x Porta da câmera Raspberry Pi
1x Porta visor Raspberry Pi
28x GPIO de usuário suportando várias opções de interface: UART, I2C, SPI, SDIO, PCM, PWM e GPCLK

Fonte: (RASPBerryPI, 2019)

Tabela 6 – Especificações de *Software - Raspberry Pi 4B*

Especificações de <i>Software</i>
Suporte ao <i>Raspberry Pi OS</i> v.6.1
Disponibilidade das funções de GPU utilizando APIs padrão
Conjunto de Instrução ARMv8

Fonte: (RASPBerryPI, 2019)

O desenvolvimento do sistema embarcado está em implementação no sistema operacional gratuito nativo disponibilizado pelo fabricante: *Raspberry Pi OS* (variante do *Debian*). Para isso, como a *Raspberry Pi 4B* não possui armazenamento interno, é necessária a utilização de um cartão microSD de 32 GB.

Muitas das funcionalidades especificadas estão em uso atualmente pelo equipamento. Estão sendo utilizadas, por exemplo: a porta UART0, junto a um módulo conversor RS-232/TTL para a comunicação com o servo motor; as portas UART3 e UART4, para a comunicação com os sensores de deslocamento; o pino GPIO 12 com PWM para o controle do *buzzer passivo* e a saída HDMI, conectada ao *display touchscreen*. Foi utilizada também a conexão *Wi-Fi* para a realização de testes e desenvolvimento de *firmware*.

Essa unidade é responsável por todo o processamento de dados, comunicações e o monitoramento e controle dos sensores e atuadores da máquina.

4.2.2 Sensor de Deslocamento

A comunicação dos sensores de deslocamento vertical e horizontal, representados na Figura 15, com a unidade de processamento foi modificada para ser realizada utilizando o protocolo RS-232 por meio dos cabos CDI dos sensores, conectados às portas UART3 e UART4 da *Raspberry Pi*. É utilizado *baud rate* de 1200 (CDI, 2006), com 8 bits de dados e 1 bit de parada (PEREIRA, 2021).

4.2.3 Célula de Carga

As conexões das células de carga (Figura 16) foram modificadas para que os valores lidos pelos painéis digitais DIN (Figura 17) sejam enviados para duas portas USB da *Raspberry Pi*, por meio de conexão COM, com *baudrate* de 9600, 8 bits de dados e 1 bit de parada (PEREIRA, 2021) (LAUREL, 2022).

Para zerar os sensores, foi desenvolvido um circuito de *reset* das células de carga. É utilizado um optoacoplador para cada sensor, controlado um enviado pela *Raspberry Pi*, que realiza, quando ativado, um curto-circuito nos pinos de entrada das células. Esse curto-circuito resulta na restauração dos valores dos sensores para zero (PEREIRA, 2021). Além disso, vale ressaltar que, antes da implementação da proposta de solução deste projeto, as unidades de medida dos valores exibidos nos painéis eram desconhecidas.

4.2.4 Servo Motor

O controle do servo motor (Figura 18) é realizado pela comunicação através da interface RS-232, convertida para a porta UART da *Raspberry Pi*. Dessa forma, a unidade de processamento controla o motor enviando os comandos referentes aos modos de velocidade e de posição do motor, descritos na Seção 3.2.3.

4.2.5 Válvulas Solenoides

Para o controle da pressão nos pistões da máquina de cisalhamento estavam sendo utilizadas válvulas simples solenoides. O sistema possuía válvulas de 3 vias que funcionam em duas posições, muito utilizadas para sistemas de controle *on-off* (OGATA, 2010). Esse modo de acionamento por solenoide permite não muitas opções de combinação, porém permite o controle das duas posições possíveis através dos pinos GPIO do sistema embarcado. Esse controle é feito através de um circuito composto por um optoacoplador e um MOSFET conectados a uma das saídas da *Raspberry Pi* (PEREIRA, 2021).

Figura 24 – Válvula simples solenoide



Fonte: (MERCADOLIVRE, 2023)

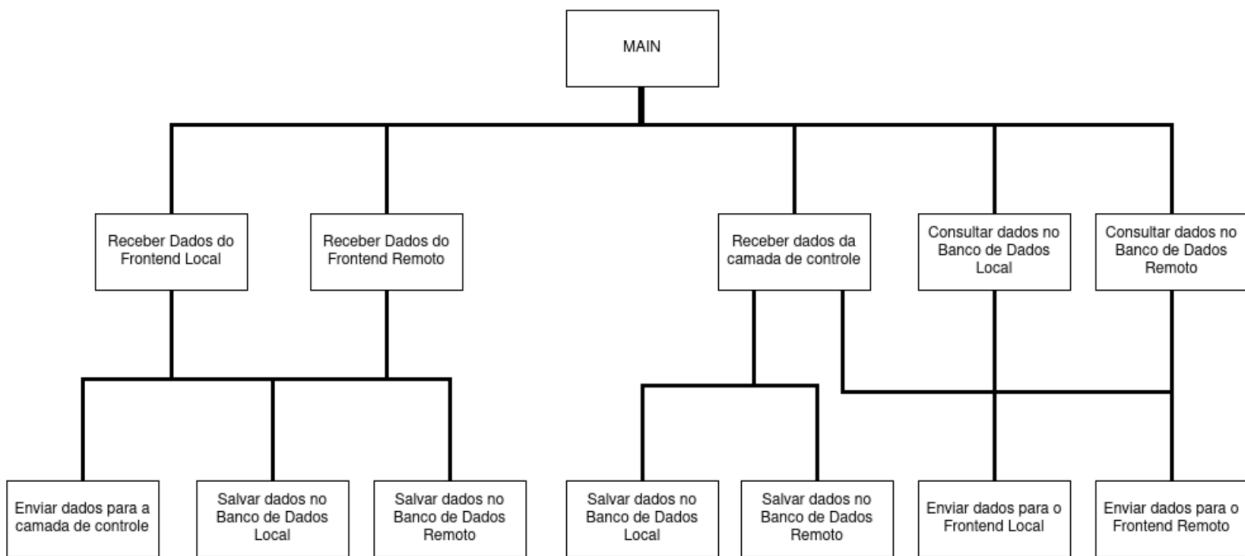
A válvula utilizada, que pode ser vista na Figura 24, do fabricante Toral Comércio, possui uma pressão máxima de operação de 150 psi (ou 10 bar) e funciona com uma tensão de 24V (MERCADOLIVRE, 2023).

4.3 Software de Alto Nível (Interface)

O *Software* de alto nível foi desenvolvido por Ivan Diniz Dobbin em um projeto de graduação do curso de Engenharia de *Software* (DOBBIN, 2022). O software foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando o *framework* Qt para a produção das interfaces gráficas, e apresenta suporte para a comunicação com o software de baixo nível através de *sockets* locais e da relação *cliente-servidor*, possibilitando garantias no envio e no recebimento de dados da camada de interface para a camada de controle.

A camada da interface permite a utilização da máquina de maneira mais simples, direta e intuitiva pelo usuário, por meio do *display touchscreen*. A camada de controle é a camada que realiza, diretamente, o controle sobre os atuadores (exemplos: servo motor e válvulas solenoides) e as leituras dos sensores (exemplos: sensores de deslocamento e células de carga). A hierarquia do *backend*, a parte que se comunica com o *software* de baixo nível, pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 – Hierarquia do *backend* do *software*



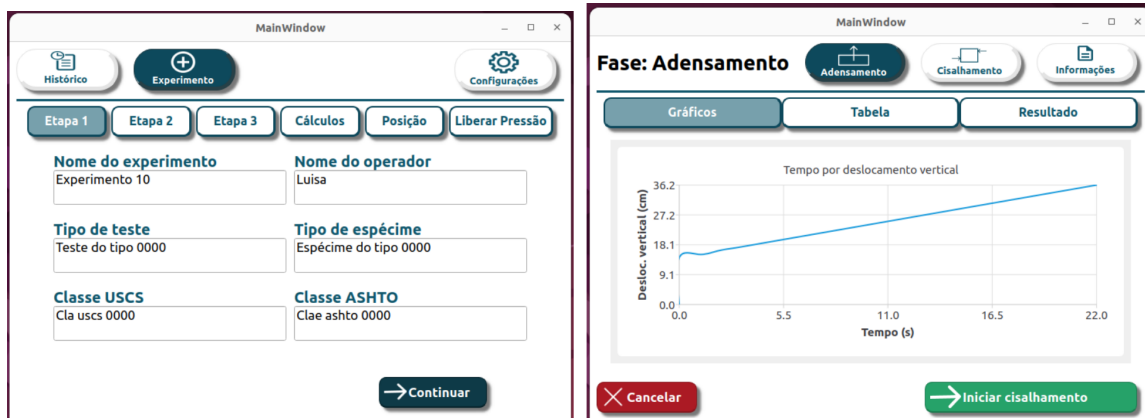
Fonte: (DOBBIN, 2022)

Para uma melhor compreensão, estão apresentadas na Figura 26 visualizações de duas páginas do *software* para os ensaios de cisalhamentos direto:

Figura 26 – Exemplos de páginas da interface

(a) Criação de novo experimento

(b) Gráfico da fase de adensamento



Fonte: (DOBBIN, 2022)

Mesmo após esses desenvolvimentos iniciais, não havia sido realizada a integração da interface com as funcionalidades de baixo nível, como, por exemplo, o acionamento do motor e leitura dos sensores, o controle de carga não era funcional e a máquina ainda não estava em uso. Para isso, foi desenvolvida uma proposta de solução que será apresentada no capítulo a seguir.

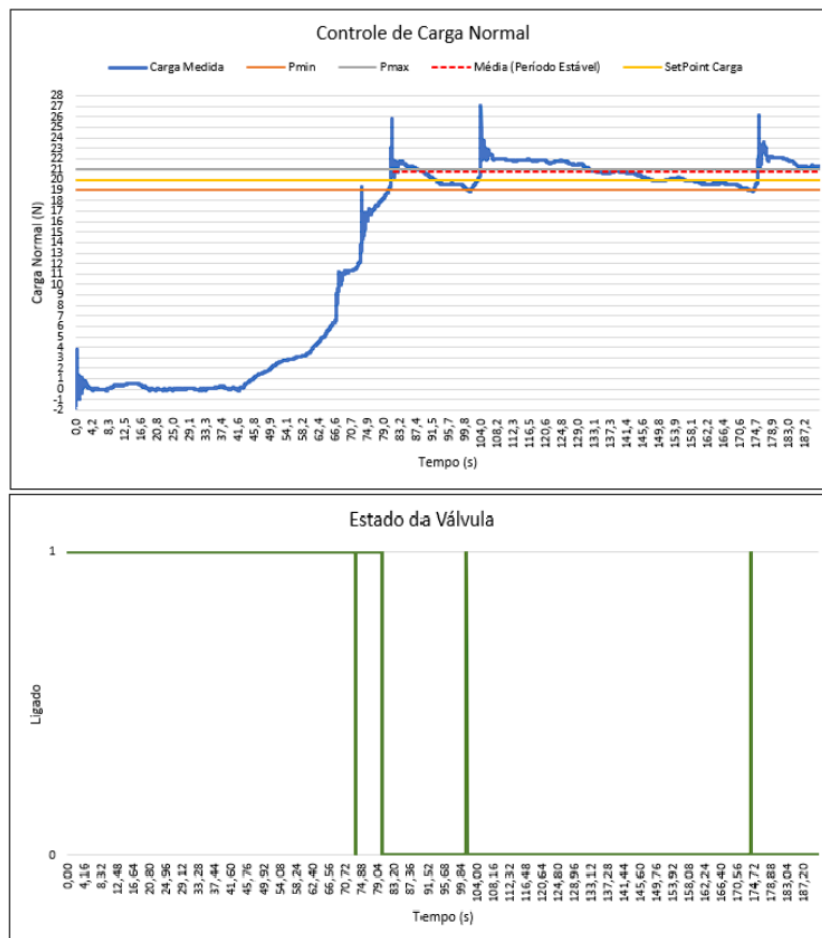
5 Proposta de Solução

Neste capítulo será apresentada uma proposta de solução, com base nos resultados obtidos em trabalhos anteriores (PEREIRA, 2021) (DOBBIN, 2022) para tentar dar solução às dificuldades encontradas. A proposta está dividida em três seções principais: Controle do Sistema Pneumático, Integração com o Software de Alto Nível e Documentação e Manuais, todos contendo as informações de cada etapa da proposta.

5.1 Controle do Sistema Pneumático

Na fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto é aplicada uma pressão nos pistões que realizam o adensamento da amostra para a inserção de uma carga normal. Para isso, é necessário realizar o controle automático da pressão atuante na amostra para garantir resultados consistentes nos ensaios.

Figura 27 – Controle inicial do sistema pneumático



Fonte: (PEREIRA, 2021)

A partir do diagrama da Figura 21, percebe-se o funcionamento a partir de quatro válvulas, sendo uma manual e as outras três automáticas. Com essa configuração, incluindo um reservatório de ar para tentar diminuir os picos no controle, obteve-se o gráfico da Figura 27.

O controle foi feito a partir dos dados de carga provenientes da célula de carga que obtém os dados verticais da amostra. Como ainda não se havia obtido um algoritmo para a conversão para pressão nem para a padronização da unidade de medida de carga, os gráficos que serão apresentados nesta seção do trabalho irão relacionar carga sem unidade de medida e tempo.

A norma internacional D3080 (6.4.1 - *Dispositivo para Aplicação da Força Normal*) da ASTM (2011) estabelece que o dispositivo deve ser capaz de manter a força normal dentro de ± 1 por cento da força especificada e, segundo a norma: "Ele deve aplicar a carga rapidamente sem exceder significativamente o valor constante"(ASTM, 2011).

Tendo esse conhecimento, entende-se que o sistema acima apresentado não estava de acordo com a norma. Para isso, foram levantadas algumas hipóteses para a melhoria do sistema de controle, a saber:

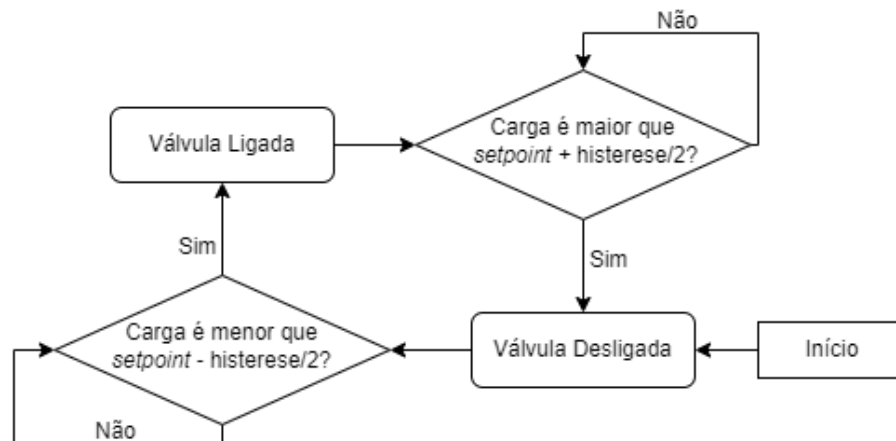
- Otimização do algoritmo de controle.
- Comparação do controle com e sem reservatório
- Aplicação de uma restrição de ar para a diminuição dos picos no controle.
- Substituição da válvula solenoide de alta pressão por uma válvula proporcional.

A seguir, serão detalhadas cada uma das opções de solução.

5.1.1 Otimização do algoritmo de controle

Foram encontradas, no algoritmo de controle, algumas possibilidades de melhorias no sistema. O algoritmo era baseado em uma combinação do desligamento e acionamento de duas válvulas: válvula de alta ventilação e válvula de ventilação, o que não possibilitava a implementação concreta de um sistema de controle *on-off*.

Foi, então, realizada uma modificação para o acionamento de apenas uma válvula: a válvula de liberação de carga (V1). Com a válvula de ventilação fechada (V2) e a de alta pressão acionada (V3), constatou-se que apenas o controle *on-off* de V1 já evidencia uma certa melhoria no sistema. O fluxograma do controle automático segue o funcionamento apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Fluxograma do controle *on-off* das válvulas solenoides

Fonte: De autoria própria

Posteriormente, foi feito um ajuste na taxa de amostragem (T_s) do algoritmo. A redução da taxa original de 40 *ms* para 1 *ms* proporcionou uma resposta mais rápida do controlador, eliminando atrasos em relação à obtenção dos dados do sensor de carga.

5.1.2 Comparação do controle com e sem reservatório

Foram realizados alguns testes com a máquina para identificar qual a melhor opção entre realizar o controle com um reservatório externo e sem o mesmo. Para os testes, foi utilizado o reservatório de ar apresentado na Figura 29.

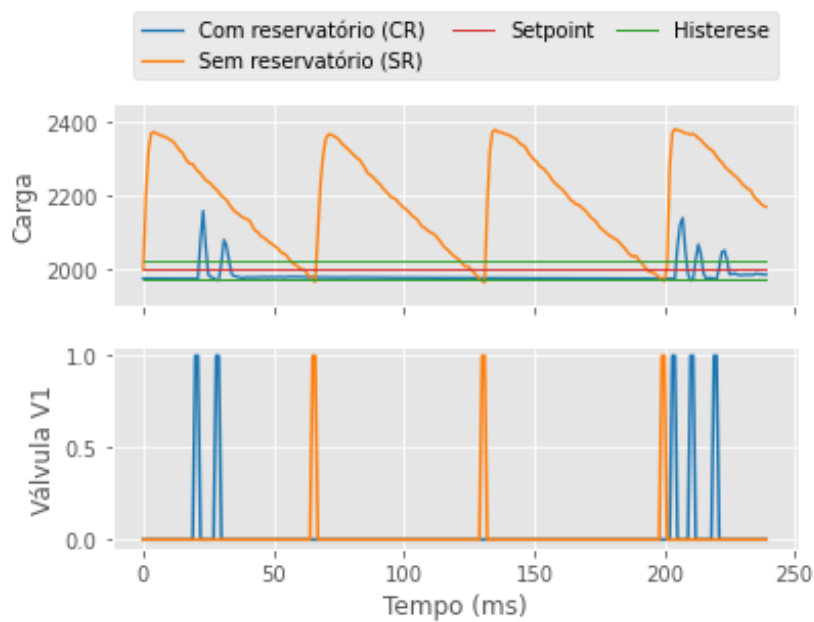
Figura 29 – Tanque de armazenamento de ar



Fonte: De autoria própria

Após esses testes de controle, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 30, estruturados em gráficos, com um recorte dos picos detectados no controle e, logo abaixo, os instantes de acionamento da válvula V1 nos dois casos.

Figura 30 – Comparação entre os picos no controle com e sem reservatório ($setpoint = 2000$ e $histerese = 50$)



Fonte: De autoria própria

Após a análise dos gráficos, é possível perceber, na Figura 30, a presença de picos. Isso se dá pelo fato da leitura dos sensores alcançar o limite inferior da histerese e causar o acionamento da válvula para que o valor de carga retorne ao valor ideal, porém a abertura da válvula solenoide percebe-se muito brusca, resultando em valores altos de carga no momento da liberação do ar. Os gráficos acima representam um recorte detalhado de alguns picos registrados nos testes de controle.

Percebe-se, no teste de controle com reservatório (linha azul), que os picos apresentam valores inferiores aos picos sem o reservatório (linha laranja). Percebe-se também a presença sempre de dois ou três picos consecutivos no momento de acionamento da válvula, com intervalos inferiores a $10ms$. Esse tipo de comportamento, em um intervalo tão curto de tempo, pode ser danoso à válvula, reduzindo-lhe a vida útil.

Uma vez que, com uma histerese de 50 e um $setpoint$ de 2000, espera-se que o controle seja mantido entre $1975 (= 2000 - (50/2))$ e $2025 (= 2000 + (50/2))$, nenhum dos dois resultados acima apresentou um resultado final satisfatório.

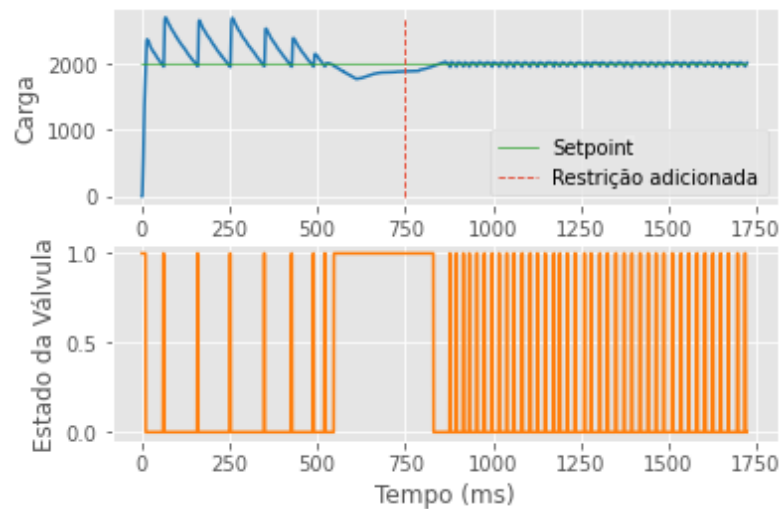
5.1.3 Aplicação de uma restrição de ar para a diminuição dos picos no controle

A próxima análise realizada foi a observação dos resultados após a aplicação de uma restrição de ar para a diminuição dos picos agudos que ultrapassavam os limites da histerese. Essa restrição, foi inicialmente realizada, para fins de teste, através do controle

manual de uma válvula de ar externa à máquina. Observou-se que a aplicação dessa restrição não surtiu efeito na configuração do sistema com o reservatório, por isso, para os próximos testes foi retirado o reservatório.

Foi então realizado um teste com o acionamento do algoritmo de controle automático e, em certo momento, a adição da restrição de ar mencionada anteriormente. A Figura 32 apresenta o resultado do teste.

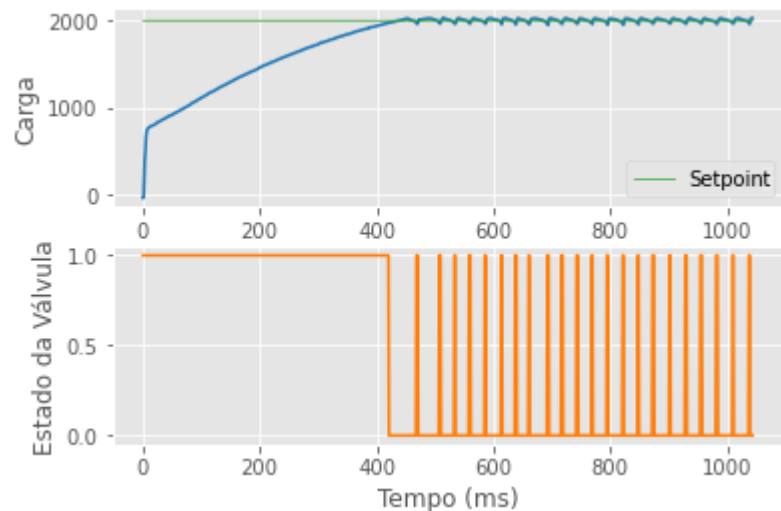
Figura 31 – Controle das válvulas com restrição adicionada (histerese = 50)



Fonte: De autoria própria

No gráfico da Figura 32 é possível observar que, após a restrição ser adicionada, houve uma grande redução nos picos de carga medidos e uma padronização da curva de controle, com dados mais próximos do valor de *setpoint*.

Figura 32 – Controle das válvulas com restrição (histerese = 50)



Fonte: De autoria própria

Os resultados obtidos através desse teste foram significativamente positivos, uma vez que esclarecem que, para a diminuição dos valores no pico do acionamento da válvula, uma boa alternativa é a diminuição do fluxo de ar. Essa diminuição possibilita uma curva de subida de carga mais suave e valores mais próximos do *setpoint* e dentro do valor de histerese previamente definido. A Figura 32 mostra o resultado do teste com a restrição aplicada desde o início.

Pode-se observar nos testes anteriores que a válvula solenoide é acionada em períodos muito curtos, com uma frequência de aproximadamente 40 Hz (a cada 25ms). Esse tipo de funcionamento não é adequado para uma válvula desse tipo, reduzindo a sua vida útil de forma considerável. À medida que a histerese é diminuída, é aumentado o número de acionamentos da válvula, dessa forma não é possível atingir o valor estabelecido na norma D3080 (ASTM, 2011).

5.1.4 Substituição da válvula solenoide de alta pressão por uma válvula proporcional

Uma possível solução ao problema do acionamento frequente da válvula solenoide é acrescentar uma válvula proporcional após a válvula de liberação (V1) ou substituir a válvula de alta pressão (V2) por ela. A válvula proporcional passaria a controlar a pressão e a solenoide regularia apenas o fechamento total do canal pneumático.

A válvula proporcional, alimentada por 24VDC, converte um dado sinal elétrico em uma dada pressão de ar comprimido na saída, possibilitando assim, não mais o controle de dois estados, mas o controle proporcional PID, para realizar a diminuição dos picos de carga, em cascata com o controle de pressão interno que a válvula possui que mantém a pressão estável no valor desejado, definido pela tensão de entrada. A válvula mencionada está representada na Figura 33.

Figura 33 – Válvula proporcional de pressão de ar



Fonte: (MASTER, 2021)

A válvula utilizada foi fabricada pela Master Tecnologia Industrial de modelo EPV1. Esta possui as seguintes especificações:

Tabela 7 – Especificações da válvula proporcional

Válvula Proporcional - EPV1	
Pressão de controle	0 a 130 psi
Máxima vazão	300 l/min
Alimentação	24 VDC
Sinal de controle	0 a 10V
Histerese	0,5

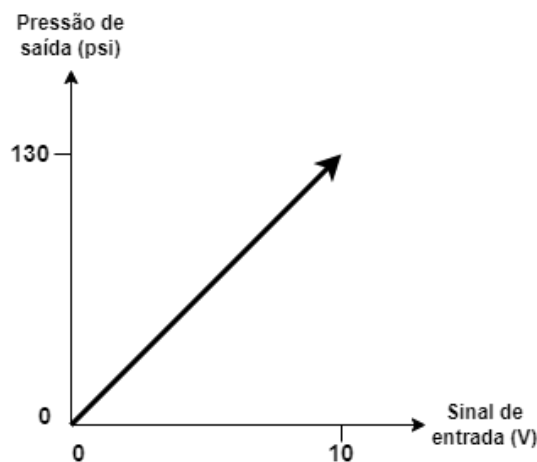
Fonte: (MASTER, 2021)

A válvula possui um cabo com conector M12 de quatro fios (2 para a alimentação e 2 para a comunicação), sendo eles (MASTER, 2021):

- Marrom: 24 VDC
- Azul: GND
- Branco: Sinal de entrada
- Preto: Sinal de *feedback*

A curva de resposta da válvula segue um comportamento linear, ou seja, uma linha reta proporcional entre o sinal de entrada em *volts* (de 0 a 10V) e a pressão de saída em *psi* (de 0 a 130 *psi*). Esse comportamento está representado na Figura 34.

Figura 34 – Funcionamento linear da válvula proporcional pneumática



Fonte: De autoria própria

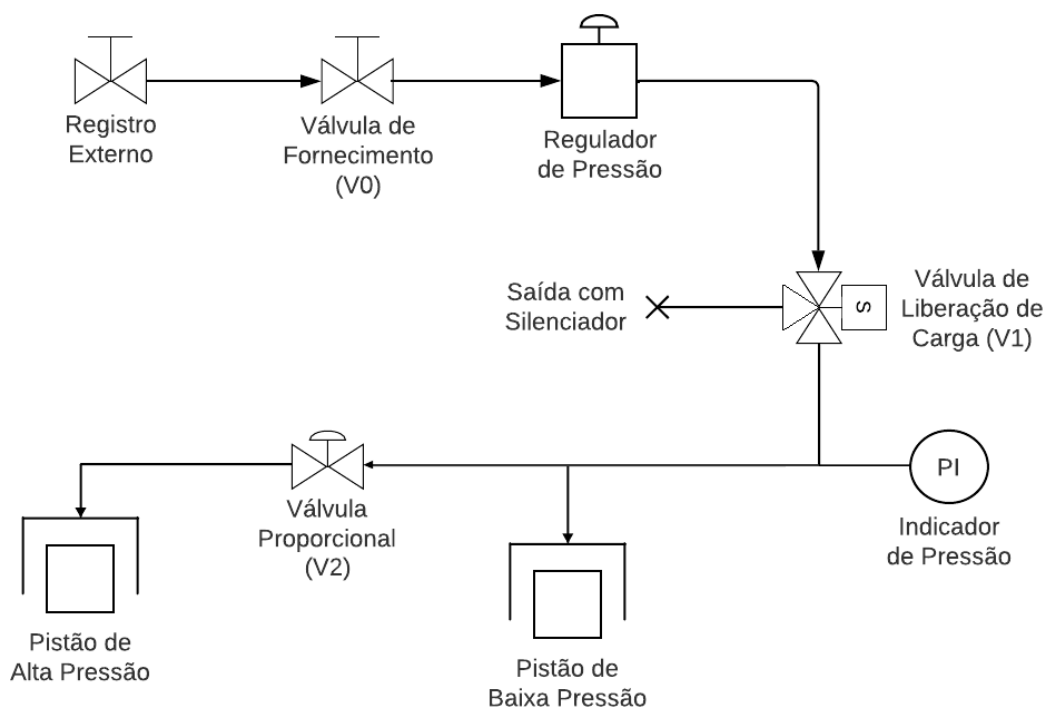
Como a faixa de tensão para o sinal de controle é de 0 a 10V e as saídas analógicas da *Raspberry Pi 4B* variam apenas de 0 a 3.3V, deve ser utilizado um circuito para a

criação de um sinal na faixa de tensões de entrada da válvula. Foram, então, levantadas as seguintes alternativas para a implementação dessa saída analógica:

- Alternativa 1: a utilização de um amplificador operacional em uma das saídas PWM da *Raspberry Pi* condicionada por um filtro passa-baixas.
- Alternativa 2: a utilização de um potenciômetro digital (também chamado de resistor digital) controlado pela interface SPI da *Raspberry Pi*, regulando a tensão na entrada da válvula através da variação de resistência.

Foi verificado, na montagem do sistema pneumático, que era redundante a presença de duas válvulas solenoides, uma vez que apenas uma dessas válvulas já pode ser utilizada tanto para o fornecimento de pressão para o restante do sistema, quanto para a liberação da pressão através de uma de suas saídas abertas, com a presença de um silenciador para diminuir o som emitido no escape do ar. Utilizando a válvula proporcional e reestruturando o sistema pneumático, o mesmo funcionaria seguindo o modelo da Figura 35.

Figura 35 – Diagrama pneumático da proposta de solução

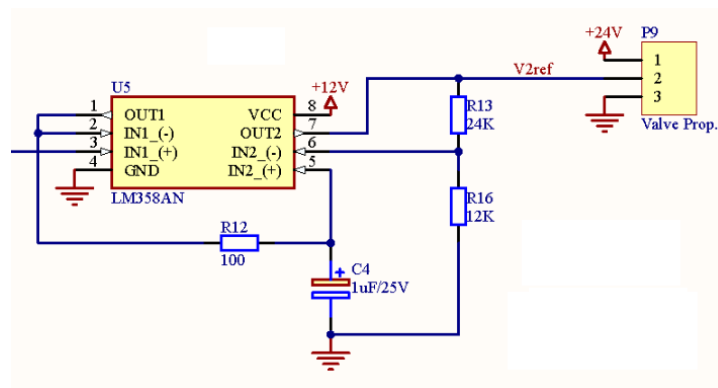


Fonte: De autoria própria

5.1.5 Circuito *Driver* para a válvula proporcional

Para a utilização da válvula proporcional, conforme mencionado na Seção 5.1.4, foi selecionada a *Alternativa 1*. Assim, foi desenvolvido um circuito *driver* para converter a saída PWM da *Raspberry Pi* de 3.3V em um sinal analógico na faixa de 0 a 10V. O circuito (Figura 36) consiste na associação de um amplificador operacional de ganho 3 com um filtro passa baixas de frequência de corte 1,6 Hz. A entrada do circuito está conectada a uma das saídas PWM da *Raspberry Pi* e a saída está conectada à entrada de controle da válvula proporcional.

Figura 36 – Esquemático do Circuito *Driver* para a Válvula Proporcional



Fonte: De autoria própria

Os resultados obtidos após a montagem e análise do circuito serão apresentados mais à frente, na Seção 6.1.1.

5.1.6 Controlador PID

O controle do sistema pneumático foi realizado através de um controlador PID incremental implementado através de uma função em linguagem C. A função recebe como entradas o valor de *setpoint* da carga e a medição atual da mesma ($y_{(n)}$) e retorna como saída ($u_{(n)}$) o valor do PWM a ser aplicado na saída PWM da válvula proporcional, controlando, assim, a carga através da pressão.

O valor da saída de controle é calculado através do seguinte algoritmo (BESTARD, 2017):

- 1. Normalização do sinal de entrada

$$y = \frac{y_{(n)}}{(\text{Valor Máximo De Carga})} \quad (5.1)$$

- 2. Cálculo do erro

$$e_{(n)} = \text{setpoint} - y \quad (5.2)$$

- 3. Cálculo e limitação da parcela integral

$$Ki = \frac{Tc}{Ti} \quad (5.3)$$

$$integral = integral + (Ki \times e_{(n)} \times Ts) \quad (5.4)$$

$$integral = \begin{cases} 0, & \text{se } u_{(n)} < ValorMínimoDoPWM, \\ 0, & \text{se } u_{(n)} > ValorMáximoDoPWM, \end{cases} \quad (5.5)$$

- 4. Cálculo da parcela proporcional

$$Kp = \frac{u_{(máx)} - u_{(mín)}}{Bp} \quad (5.6)$$

$$proporcional = Kp \times e_{(n)} \quad (5.7)$$

- 5. Cálculo da parcela derivativa

$$derivativo = Kd \times \frac{(e_{(n)} - e_{(n-1)})}{Ts} \quad (5.8)$$

- 6. Cálculo do incremento

$$incremento = proporcional + integral + derivativa \quad (5.9)$$

- 7. Cálculo da saída desnormalizada

$$u_{(n)} = u_{(n-1)} + incremento \times ValorMáximoDoPWM \quad (5.10)$$

- 8. Limitação do valor da saída

$$u_{(n)} = \begin{cases} ValorMínimoDoPWM, & \text{se } u_{(n)} < ValorMínimoDoPWM, \\ ValorMáximoDoPWM, & \text{se } u_{(n)} > ValorMáximoDoPWM, \end{cases} \quad (5.11)$$

onde:

- y_n = Entrada atual
- y = Entrada normalizada
- e_n = Erro atual
- e_{n-1} = Erro anterior
- Tc = Tempo de Controle
- Ti = Tempo de Integração

- Bp = Banda Proporcional
- Kp = Ganho proporcional
- Ki = Ganho integral
- Kd = Ganho derivativo
- u_n = Saída atual
- u_{n-1} = Saída anterior

5.1.7 Proposta para o controle do sistema pneumático

Após a realização dos estudos e testes mencionados nas seções anteriores, foram desenvolvidas algumas melhorias e duas principais opções de solução para o melhor funcionamento do controle de pressão. As duas opções serão retomadas a seguir, com a apresentação das vantagens e desvantagens de cada uma:

- Controle sem reservatório com válvulas solenoides e restrição de ar:
 - Vantagens: simplicidade de controle, pela utilização de um simples controle *on-off*; baixo custo das válvulas.
 - Desvantagens: a demora do tempo de acionamento; possui apenas dois estados, dificultando o controle mais exato e sem picos; a possibilidade de dano na válvula devido à alta frequência de acionamento.
- Controle sem reservatório com uma válvula solenoide e uma válvula proporcional:
 - Vantagens: possui uma liberação de ar proporcional, reduzindo o erro de controle; acionamento mais suave no pistão.
 - Desvantagens: alto custo para aquisição; requer um algoritmo de controle mais complexo.

Conhecendo os dois cenários, optou-se pela execução do controle sem reservatório com uma válvula solenoide e uma válvula proporcional devido à maior robustez e exatidão que proporciona ao sistema.

5.2 Integração com o Software de Alto Nível

Para o funcionamento completo da máquina de cisalhamento direto é necessária a realização da integração da camada de controle, em *software* de baixo nível, com a interface, em *software* de alto nível. Para tanto, foram realizados alguns estudos e testes,

a fim de levantar o estado atual de funcionamento e integração do sistema embarcado já existente e quais serão as frentes de desenvolvimento para a implementação dessa integração.

5.2.1 Testes Realizados

A fim de identificar o estado atual do sistema, foram realizados testes individuais de cada parte do sistema embarcado, a saber:

5.2.1.1 Leitura dos sensores

O teste foi bem-sucedido e mostrou bom funcionamento dos sensores e do algoritmo de leitura dos mesmos. Pode ser visto na Figura 37 o resultado de uma amostra da leitura de todos os sensores da máquina.

Figura 37 – Teste de leitura dos sensores

```
-----  
Reading sensors - Sample period: 1s ...  
Amostra nº: 32  
Leitura sensor de carga 1: 0019.6  
Medida sensor de carga 1: 19.60  
Leitura sensor de deslocamento 1: > .012 ,MM  
Medida sensor de deslocamento 1: 0.012  
Leitura sensor de carga 2: -0006.3  
Medida sensor de carga 2: -6.30  
Leitura sensor de deslocamento 2: > .014 ,MM  
Medida sensor de deslocamento 2: 0.014  
-----
```

Fonte: De autoria própria

5.2.1.2 Ativação do *buzzer*

Está sendo utilizado um *buzzer* passivo para a emissão de sinais de alerta, porém essa funcionalidade ainda não estava em funcionamento juntamente com o sistema geral. Através do teste, constatou-se que a ativação do *buzzer* estava sendo realizada (com apenas um tom) através de uma biblioteca chamada "*softTone.h*", que tem seu funcionamento baseado em funções de *delay*. Esse tipo de funcionamento poderia ocasionar travamentos e demoras no *software*, pois o programa iria aguardar o tempo determinado de *delay* antes de executar as demais atividades.

5.2.1.3 Controle do servo motor

O servo motor é controlado através do envio de dados via comunicação serial UART seguindo o padrão de comunicação mencionado na Seção 3.2.3. O algoritmo possuía algumas falhas na configuração inicial do motor, porém a comunicação nos modos de posição e velocidade ocorre com resposta do servo motor.

5.2.1.4 Controle das válvulas de pressão

Os testes, resultados e propostas de solução referentes ao controle das válvulas de pressão foram previamente abordados na Seção 5.1.

5.2.1.5 Comunicação via *sockets*

Nos testes iniciais, não ocorreu a comunicação via *sockets* entre servidores e clientes da interface e do *software* de baixo nível. O teste permitiu constatar mau funcionamento na comunicação via *sockets* locais. Os programas não identificavam os diretórios e não estabeleciam a conexão local corretamente entre si, impossibilitando o envio de quaisquer tipos de dados.

5.2.2 Proposta de Solução para a Integração

Uma vez identificadas as necessidades de melhoria e correção, foram desenvolvidas as seguintes propostas para o sistema embarcado:

5.2.2.1 Ativação do *buzzer*

Como constatado, o *buzzer* passivo utilizava uma biblioteca baseada em *delays*, causando prejuízo na integração com as demais partes do sistema. Foi, então, implementado um algoritmo para a ativação através da geração de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso), o que permite o funcionamento do restante do código de forma independente de *delays* e atrasos de tempo.

Figura 38 – Código exemplo de acionamento do *buzzer*

```
int main(void)
{
    printf("Raspberry Pi wiringPi test program\n");

    if(wiringPiSetupGpio() == -1)
        exit(1) ;

    pinMode(12, PWM_OUTPUT);
    pwmSetMode(PWM_MODE_MS);
    pwmSetClock(200);
    pwmSetRange(100);
    for(int i = 0; i<=2; i++)
    {
        pwmWrite(12, 5);
        delay(300);
        pwmWrite(12, 0);
        delay(300);
    }
}
```

Fonte: De autoria própria

O código da Figura 38 foi desenvolvido em linguagem C, utilizando a biblioteca *WiringPi*, que permite o uso do PWM em *hardware* para obter uma precisão maior e não sobrecarregar o sistema de processamento. Esse algoritmo exemplifica o acionamento do componente e permite também controlar a tonalidade do som emitido pelo *buzzer* através do controle da frequência do PWM.

O próximo passo é a inserção desse código no código geral do ensaio, nos momentos críticos em que o usuário necessita de avisos, como: início do ensaio, término do ensaio e identificação de erros e falhas.

5.2.2.2 Comunicação via *socket*

A integração entre o baixo e alto níveis do sistema embarcado deveria ocorrer, majoritariamente, via *sockets* locais. O que se constatou é que a interface apresentava um funcionamento correto ao nível dessa comunicação, porém o *software* de baixo nível não apresentava.

Após a correção das configurações de criação dos *sockets* locais em C, foi realizado com sucesso um teste de envio (Figura 39) e recebimento de dados (Figura 40) pelos dois níveis diferentes. O teste é exemplificado nas Figuras 39 e 40. A Figura 39 mostra a visão do terminal após o envio de um comando pela interface e a Figura 40 mostra a visão do terminal com os dados recebidos pela camada de controle.

Figura 39 – Teste dos *sockets* - Envio de dados pela interface

```
thread iniciando ..
Antes do accept interface
Depois do accept interface
SampleNumber 0
Displacement[0] 14.2
Displacement[1] 28.2
Load[0] 100.2
Load[1] 200.2
State 1
```

Fonte: De autoria própria

Figura 40 – Teste dos *sockets* - Recebimento de dados da interface

```
infralab@raspberrypi:~/backupCodigoTCC2/Code $ ./machine_socket
Antes do accept machine
Depois do accept machine
Comando 0
liberei a thread
Enabled = 1 Sample Period= 100
Comando 1
Velocity = 10
Nome = ./interface
./interface
Tamanho = 13
```

Fonte: De autoria própria

Os dados eram enviados através de uma *struct*, porém esses dados não estavam padronizados de forma que a camada de controle utilizasse os dados da mesma, que contém os detalhes do comando enviado.

A proposta de solução para a integração é a padronização nas configurações de *socket* como, por exemplo, os nomes e diretórios dos *sockets* e a padronização dos tipos de dados enviados e recebidos, para estar em concordância com a interface e para haver uma continuidade entre o funcionamento da interface e da máquina.

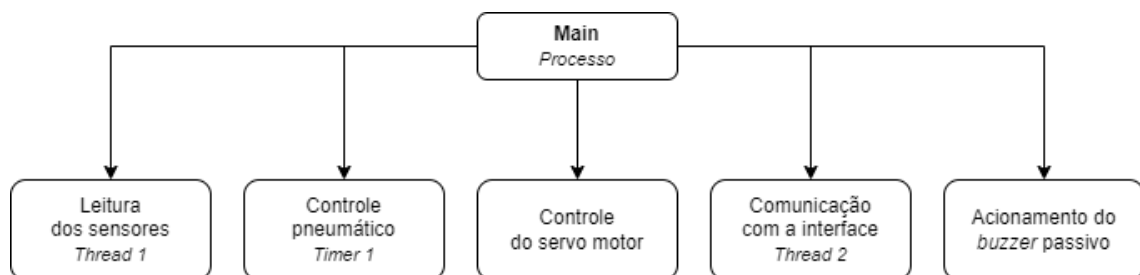
5.2.2.3 *Threads* e *Timers*

Para a execução completa de um ensaio de cisalhamento direto, de início a fim, é necessária a implementação de um sistema capaz de executar rotinas que devem funcionar de forma concorrente e independente. A alternativa escolhida para a implementação desse sistema foi a combinação da utilização de *threads* e *timers*.

As *threads* são mecanismos que permitem o funcionamento de diferentes operações simultaneamente, utilizando o mesmo espaço de memória e compartilhando as variáveis globais do programa (TANENBAUM; BOS, 2015). O sistema operacional *Raspberry Pi OS*, que está em utilização na *Raspberry Pi* da máquina de cisalhamento, por ser uma distribuição LINUX, oferece uma biblioteca para a utilização de *threads*, chamada "*pthread.h*".

Os *timers* são componentes de *hardware* integrados no sistema que permitem a medição e o controle preciso do tempo, ativando sinais que realizam rotinas definidas em funções específicas.

Figura 41 – Fluxograma de funcionamento do programa com *threads* e *timers*



Fonte: De autoria própria

Como sistematiza a Figura 41, será utilizada uma relação entre o processo principal e a criação de duas *threads* e de um *timer*. Dessa forma, o algoritmo consegue realizar tarefas de forma paralela e com um controle preciso de tempo.

5.2.3 Melhorias Gerais

Após os estudos e testes realizados neste trabalho, foram levantadas algumas oportunidades pontuais de melhorias no sistema da máquina, para uma melhor utilização. Essas melhorias executadas serão apresentadas a seguir.

5.2.3.1 Inicialização automática

O *script* antigo de automação para a inicialização da interface e da camada de controle da máquina envolvia uma nova compilação de todos os programas, o que causava uma grande demora (cerca de 5 minutos). Tendo isso em vista, foram desenvolvidos dois *scripts*, que foram inseridos nos arquivos de inicialização da *Raspberry Pi*. O primeiro *script* (Figura 42) apaga os arquivos temporários de *sockets* abertos anteriormente e executa o *software* de alto nível, denominado de "interface".

Figura 42 – *Script* de inicialização automática 1

```
#!/bin/bash

rm /home/infralab/interface
rm /home/infralab/machine
/home/infralab/backupCodigoTCC2/Code/build/Interface
```

Fonte: De autoria própria

O segundo *script* (Figura 43) executa o *software* de baixo nível, denominado de "machine".

Figura 43 – *Script* de inicialização automática 2

```
#!/bin/bash

/home/infralab/backupCodigoTCC2/Code/execute_machine
```

Fonte: De autoria própria

Com os *scripts* acima implementados, a interface é iniciada no mesmo momento em que a *Raspberry Pi* inicializa, sendo imperceptível qualquer atraso na sua abertura.

5.2.3.2 Calibragem de tela

Foi utilizado um algoritmo para calibragem de telas genéricas chamado "*xinput calibrator*". Ao executar esse algoritmo, o usuário clica nos locais indicados na tela e é gerada uma lista de parâmetros a serem inseridas no arquivo de configuração de tela

da *Raspberry Pi*. A título de conhecimento, os parâmetros são gerados com o seguinte formato:

Figura 44 – Parâmetros de calibragem de tela

```
Section "InputClass"
  Identifier      "calibration"
  MatchProduct   "wch.cn USB2IIC_CTP_CONTROL"
  Option "MinX"    "1419"
  Option "MaxX"    "64052"
  Option "MinY"    "1875"
  Option "MaxY"    "63332"
  Option "SwapXY"  "0" # unless it was already set to 1
  Option "InvertX" "0" # unless it was already set
  Option "InvertY" "0" # unless it was already set
EndSection
```

Fonte: De autoria própria

5.2.3.3 Teclado Virtual

Nos trabalhos anteriores de desenvolvimento da *interface* do usuário (DOBBIN, 2022), foi definida a utilização do teclado virtual *Onboard* para o preenchimento dos parâmetros das telas iniciais. Porém, essa funcionalidade apresentava algumas inconsistências com a aplicação. Como alternativa para evitar essas inconsistências, a estratégia adotada foi a utilização de um ícone do teclado *Onboard* na barra de ferramentas no sistema operacional para o acionamento deste teclado e a utilização pelo usuário.

5.3 Documentação e Manuais

Após o início do processo de *retrofit* ao qual o equipamento está sendo submetido não houve o desenvolvimento de documentação para o usuário. Uma vez que a máquina de cisalhamento será utilizada por diversas pessoas, para diversos cursos e disciplinas, é de grande importância a explicação do seu funcionamento, para uma correta utilização.

A proposta é o desenvolvimento de dois tipos de documentação: um **Manual do Usuário** e um **Manual Técnico do Sistema Embarcado**. O primeiro para os fins mencionados no início desta seção e o segundo para futuras atividades de pesquisa e manutenção na máquina.

6 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste projeto. Estes serão discutidos em cinco seções, a saber: os resultados das modificações no Sistema Pneumático, as funcionalidades implementadas no Sistema Embarcado, os resultados da Configuração das Células de Carga, os resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto, os resultados do Teste de Usabilidade e, por fim, as informações sobre a documentação do projeto e os Manuais desenvolvidos.

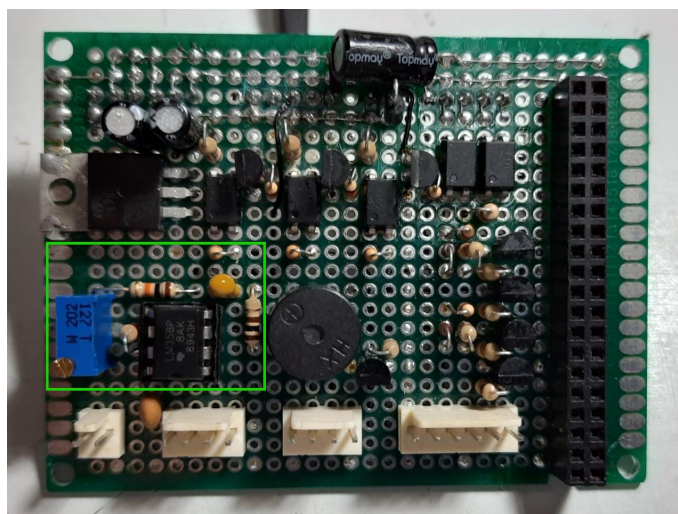
6.1 Sistema Pneumático

O sistema pneumático final foi montado com a válvula proporcional, conforme o diagrama apresentado na Figura 35. A seguir, serão apresentados os resultados da análise do circuito *driver* para a válvula proporcional e do controle do sistema pneumático.

6.1.1 Circuito Driver

A montagem do circuito *driver* para a válvula proporcional foi realizada na placa de condicionamento eletrônico desenvolvida em trabalhos anteriores (PEREIRA, 2021). Foi verificado seu funcionamento em um osciloscópio do fabricante TEKTRONIX. A montagem pode ser vista na área destacada na Figura 45.

Figura 45 – Placa de Condicionamento Eletrônico com o Circuito *Driver*



Fonte: De autoria própria

Para a análise da saída do circuito *driver* no osciloscópio foram feitos testes variando a saída PWM, que pode ser vista nas linhas amarelas (CH1), em cinco estágios:

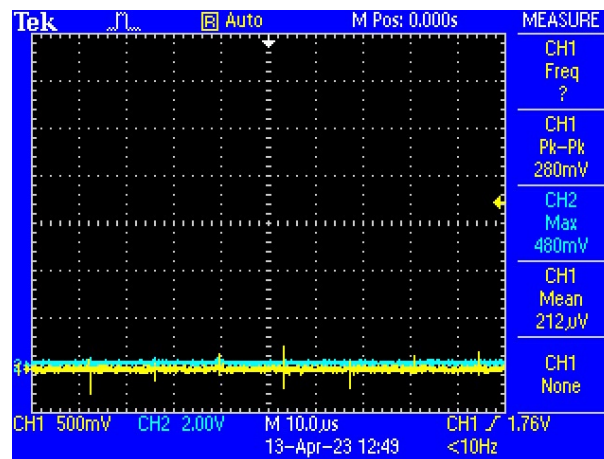
0% (Figura 46), 25% (Figura 47), 50% (Figura 48), 75% (Figura 49) e 100% (Figura 50). Os objetivos principais com esses testes foram analisar a amplificação do sinal (estágio de amplificação), a linearidade do circuito e a estabilidade do sinal (estágio de filtragem). Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da análise em osciloscópio

PWM	Saída Esperada	Saída Obtida	Ripple
0%	0 V	0,48 V	0,16 V
25%	2,5 V	2,88 V	0,24 V
50%	5 V	5,28 V	0,24 V
75%	7,5 V	7,52 V	0,24 V
100%	10 V	9,92 V	0,08 V

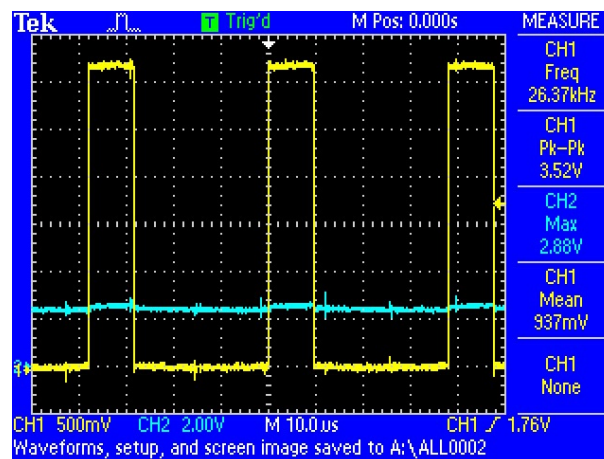
Fonte: De autoria própria

Figura 46 – Análise do Circuito *Driver* em osciloscópio - PWM = 0%

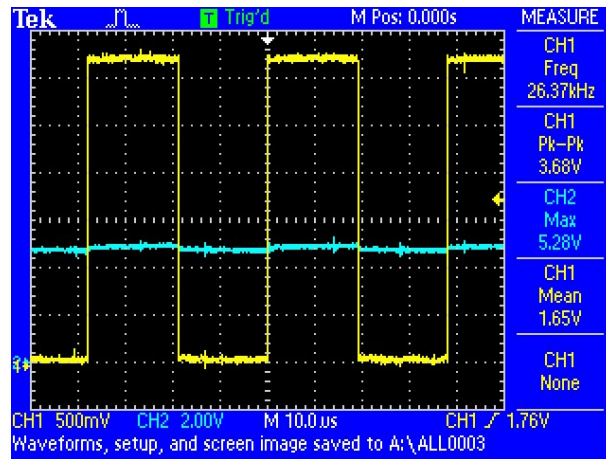


Fonte: (TEKTRONIX... , 2023)

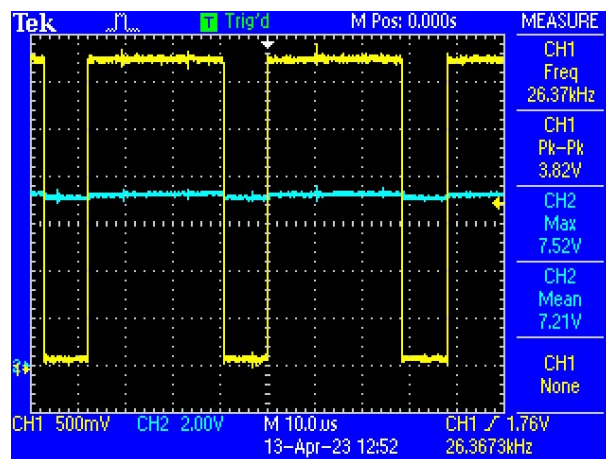
Figura 47 – Análise do Circuito *Driver* em osciloscópio - PWM = 25%



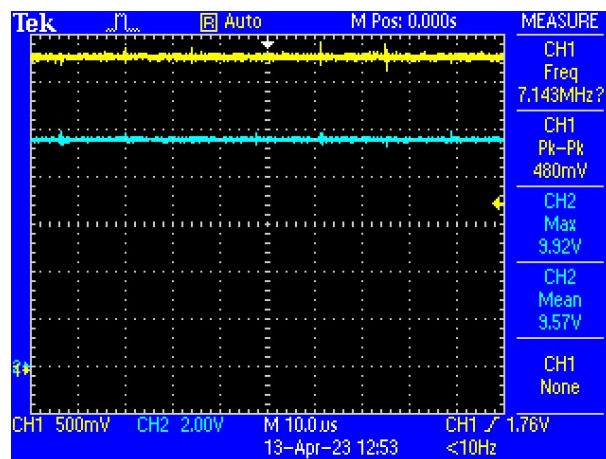
Fonte: (TEKTRONIX... , 2023)

Figura 48 – Análise do Circuito *Driver* em osciloscópio - PWM = 50%

Fonte: (TEKTRONIX..., 2023)

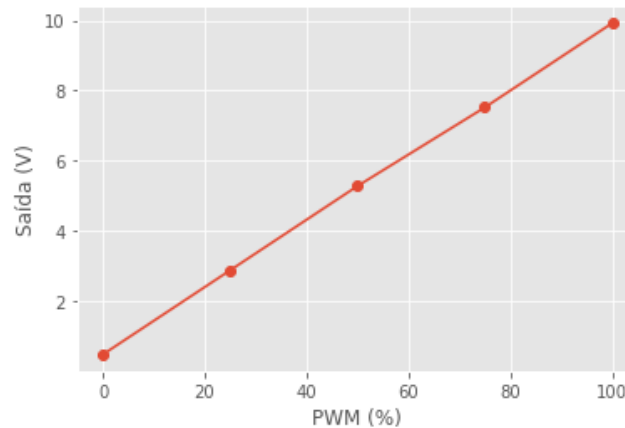
Figura 49 – Análise do Circuito *Driver* em osciloscópio - PWM = 75%

Fonte: (TEKTRONIX..., 2023)

Figura 50 – Análise do Circuito *Driver* em osciloscópio - PWM = 100%

Fonte: (TEKTRONIX..., 2023)

Figura 51 – Análise de Linearidade do Circuito Driver



Fonte: De autoria própria

Percebe-se, com base nas imagens e nos valores apresentados, um bom comportamento do circuito no estágio de amplificação, em que o circuito proporciona as saídas na faixa de 0 a 10V, e, com base nas saídas vistas no osciloscópio (linha azul - CH2), a estabilidade esperada no sinal de saída. Embora o *ripple* tenha atingido 0,24 V, a válvula faz a filtragem do sinal de entrada e, por conta da frequência do sinal, que atinge 26 kHz, o valor fica estável no sinal de referência da válvula. A Figura 51 evidencia o comportamento linear esperado para o circuito, sendo válido na utilização para o controle da válvula proporcional.

6.1.2 Controle do Sistema Pneumático

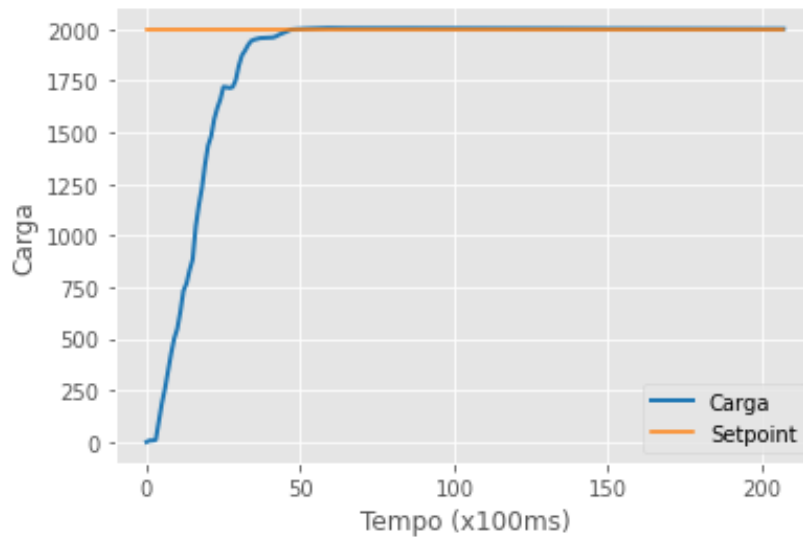
Tendo como configuração o esquemático da Figura 35, o sistema pneumático é controlado em três etapas durante um ensaio de cisalhamento direto:

- 1. Abertura da Válvula de Fornecimento: consiste na abertura manual da válvula que controla o fornecimento da pressão de ar para o sistema.
- 2. Liberação da Baixa Pressão: consiste na ativação, pelo usuário, da válvula solenoide V1 que libera a passagem do ar para o pistão de baixa pressão, através da interface gráfica.
- 3. Controle PI: consiste no controle Proporcional-Integral da carga aplicada pela pressão controlada da válvula proporcional. O valor de carga é definido pelo usuário na interface gráfica.

A etapa do Controle PI foi desenvolvida através de uma função em linguagem C que implementa um controlador PID (esse controlador foi apresentado na Seção 5.1.6). O

algoritmo possui três constantes de ganho que definem as parcelas Proporcional, Integral e Derivativa: K_p (Ganho Proporcional), K_i (Ganho Integral) e K_d (Ganho Derivativo). Foram utilizadas apenas as parcelas Proporcional, para corrigir o valor de carga de maneira proporcional ao erro e Integral, para mitigar o erro em estado estacionário do controlador PID, por isso, trata-se de um controle PI.

Figura 52 – Gráfico do Controle PI da Válvula Proporcional



Fonte: De autoria própria

O gráfico apresentado na Figura 52 foi obtido como resultado após a realização de um teste na máquina de cisalhamento no qual o *setpoint* de carga foi definido em 2000 e o algoritmo de controle automático foi executado utilizando a seguinte configuração:

$$K_p = 0.1 \quad (6.1)$$

$$K_i = 0.001 \quad (6.2)$$

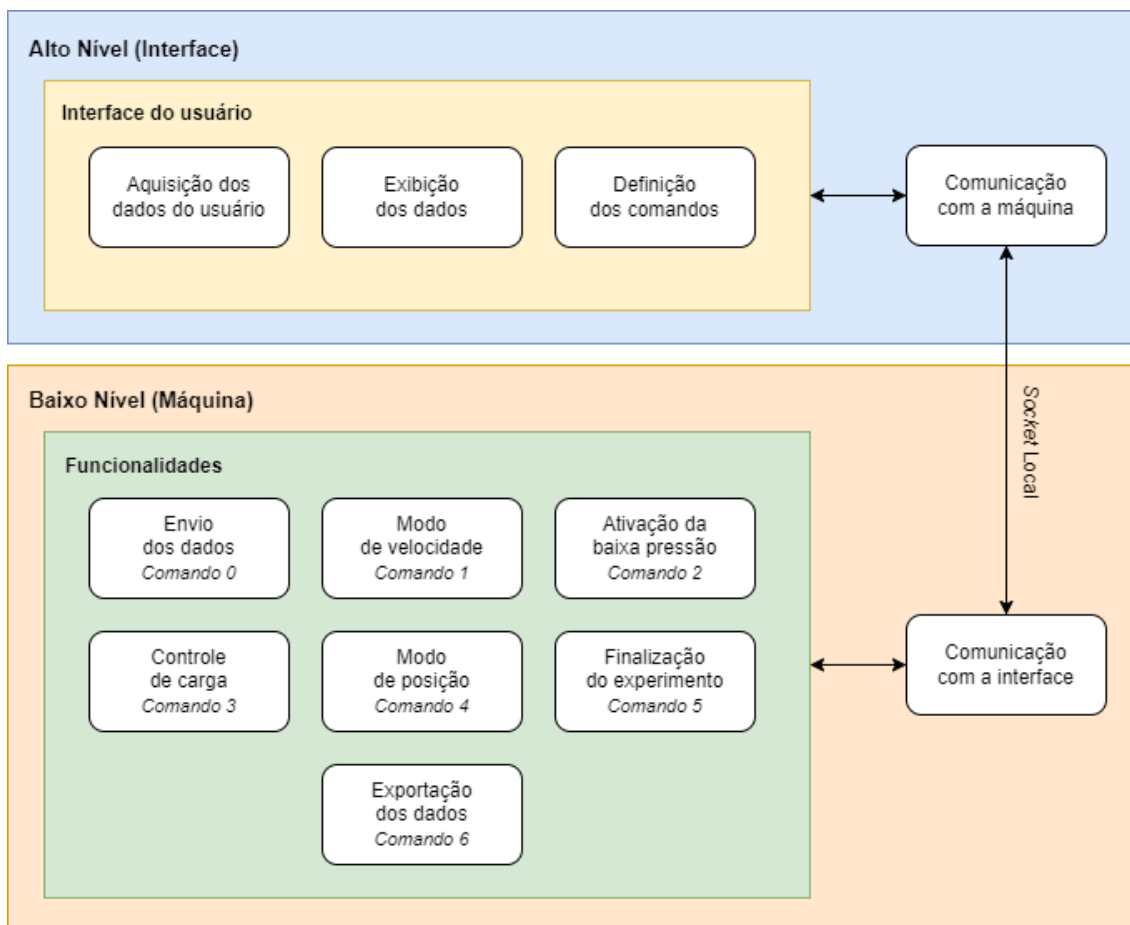
$$K_d = 0.0 \quad (6.3)$$

O controlador apresentou resultados positivos, observando-se a Figura 52, onde é possível identificar um Sistema Criticamente Amortecido. Esse era o tipo esperado de sistema de controle, pois, além de apresentar um bom tempo de resposta (aproximadamente 5 segundos), o modelo não ultrapassa o valor de *setpoint* e mantém o erro do valor de carga (cerca de 0.2%) dentro da faixa de $\pm 1\%$ do valor esperado, como define a Norma Internacional D3080 (ASTM, 2011).

6.2 Sistema Embarcado

Após a implementação do que foi definido na proposta de solução na Seção 5.2 foram realizadas a implementação das funcionalidades do sistema embarcado e a integração entre os *softwares* de baixo e alto nível. Essas funcionalidades e a integração podem ser vistas na Figura 53 que sistematiza o diagrama de integração do sistema embarcado da máquina.

Figura 53 – Diagrama de Integração do Sistema Embarcado



Fonte: De autoria própria

Os resultados serão apresentados detalhadamente nas seções a seguir.

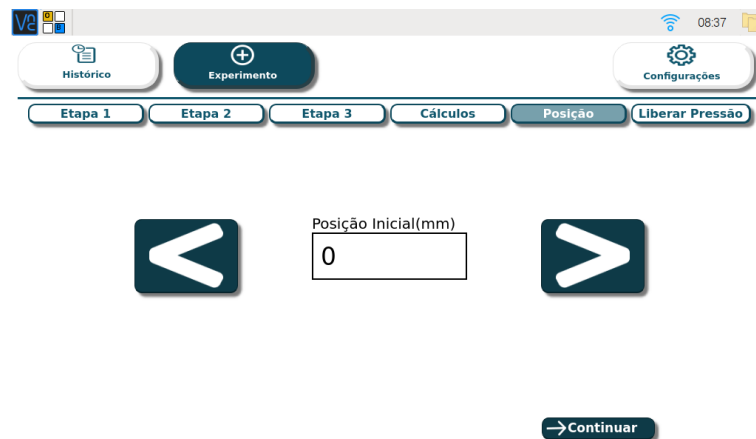
6.2.1 Funções do Sistema

Para a execução de ensaios de cisalhamento direto, foram implementadas, em um sistema embarcado, algumas funcionalidades, as quais serão apresentadas a seguir. Dentre elas, inicialmente havia apenas o funcionamento do motor e a leitura dos sensores, de forma individual, sem integração com a interface e sem adequação às normas e aos procedimentos do ensaio.

6.2.1.1 Ajuste de posição inicial

O sistema possui uma página na qual o usuário pode ajustar a posição inicial do carrinho com a amostra através de dois botões, que representam o deslocamento para a esquerda e o deslocamento para a direita, conforme mostra a Figura 54. O usuário pode, também, ver na tela um número com a posição atual do carrinho, em milímetros, com precisão de três casas decimais.

Figura 54 – Tela de ajuste de posição inicial



Fonte: De autoria própria

Tal funcionalidade foi implementada a partir do controle do servo motor e do sensor de deslocamento horizontal. Esse controle é realizado em duas situações:

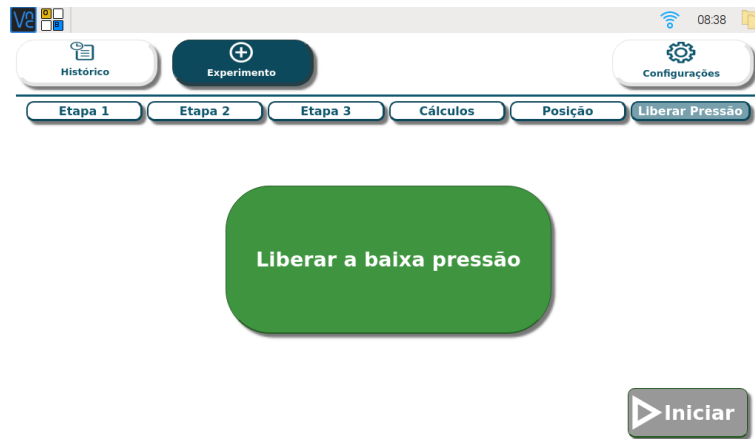
- Botão pressionado:
 - É acionado o modo de velocidade, enviando para o motor o comando MV $A=100$ $V=32212$, que define o movimento com aceleração igual a 100 e velocidade de 1 *RPS*.
 - É ativada a leitura dos sensores e o valor recebido do sensor de deslocamento horizontal é enviado para a interface pelo *socket* local e apresentado no campo dedicado na tela.
- Botão solto:
 - É acionado o modo de parada do movimento, enviando para o motor o comando X , que realiza a parada do motor com uma desaceleração gradual.
 - É pausada a leitura dos sensores e mantido o último valor recebido na tela.

6.2.1.2 Ativação do pistão de baixa pressão

Antes de iniciar de fato a fase de adensamento do ensaio, há uma tela para a ativação do pistão de baixa pressão, apresentada na Figura 55. O funcionamento desta

etapa consiste em executar um comando que aciona a válvula solenoide V1 e que fornece a pressão de ar para o pistão de baixa pressão, mas não ainda para o pistão de alta pressão. O usuário pode ativar ou desativar essa pressão, mas o botão de iniciar o ensaio só será ativado quando a pressão estiver ativada.

Figura 55 – Tela de ativação do pistão de baixa pressão

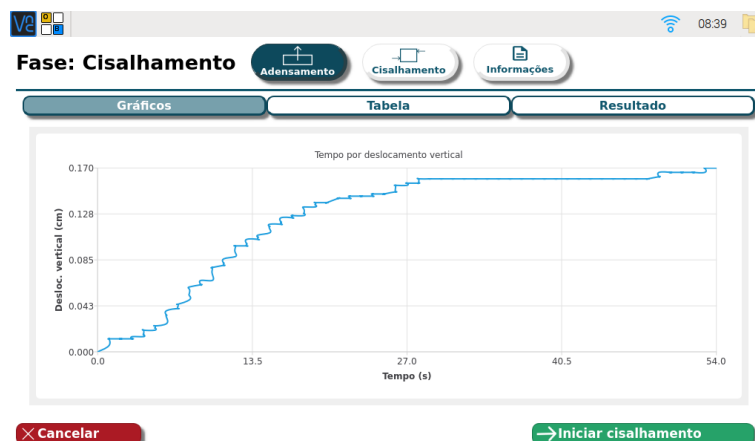


Fonte: De autoria própria

6.2.1.3 Fase de Adensamento

Ao pressionar o botão de iniciar, o *buzzer* emite um sinal sonoro indicando o início do ensaio e será exibida a tela do experimento na fase de adensamento. Na primeira tela, Figura 56 (Gráfico) está disponível um gráfico atualizado em tempo real com os dados de Carga Normal x Deslocamento Vertical. Na segunda tela, Figura 57, (Tabela) há uma tabela, também atualizada em tempo real, com os dados do experimento relevantes para essa primeira fase, tais como: horário, deslocamento vertical, carga normal. Por fim, há a tela de Resultados (Figura 58), que apresenta os resultados do cálculo de algumas variáveis, como: tempo total de adensamento, leitura da carga final e mudança de altura.

Figura 56 – Tela da Fase de Adensamento - Gráfico



Fonte: De autoria própria

A atualização dos dados apresentados tanto no gráfico quanto na tabela ocorre a partir da leitura dos sensores de deslocamento e de carga a uma taxa de amostragem de 100 ms e do seu envio para a interface por intermédio do *socket* local.

Figura 57 – Tela da Fase de Adensamento - Tabela

N. amostra	Dia	H:min:seg:ms	Desl.ver.(mm)	Carga nor.(KPa)
1	29/4/23	8:39:16:616	0.18	-41.8
2	29/4/23	8:39:16:793	0.024	-41.7
3	29/4/23	8:39:16:985	0.024	291.2
4	29/4/23	8:39:17:176	0.118	1668.8
5	29/4/23	8:39:17:353	0.162	2264.8
6	29/4/23	8:39:17:577	0.182	2224.3
7	29/4/23	8:39:17:752	0.182	2221.9
8	29/4/23	8:39:17:961	0.182	2223.8
9	29/4/23	8:39:18:137	0.182	2224.4
10	29/4/23	8:39:18:345	0.182	2220.9
11	29/4/23	8:39:18:520	0.182	2219.6
12	29/4/23	8:39:18:728	0.182	2217.4

Fonte: De autoria própria

Nesta etapa ocorrem, também, mais duas funcionalidades: o controle automático de carga, mencionado na Seção 6.1.2 e a opção para que o usuário exporte os dados desta fase do experimento, procedimento esse que será explicado detalhadamente na Seção 6.2.4.

Por fim, o usuário pode pressionar o botão de iniciar o cisalhamento e dar continuidade ao ensaio.

Figura 58 – Tela da Fase de Adensamento - Resultados

Variável	Valor
Tempo Total Adensamento	0H:1min:15seg:212ms
Leitura da carga final (KPa)	2098.2
Altura final (mm)	4998.18
Mudança de altura (mm)	0.182
Volume Final adensamento (cm³)	19234.7

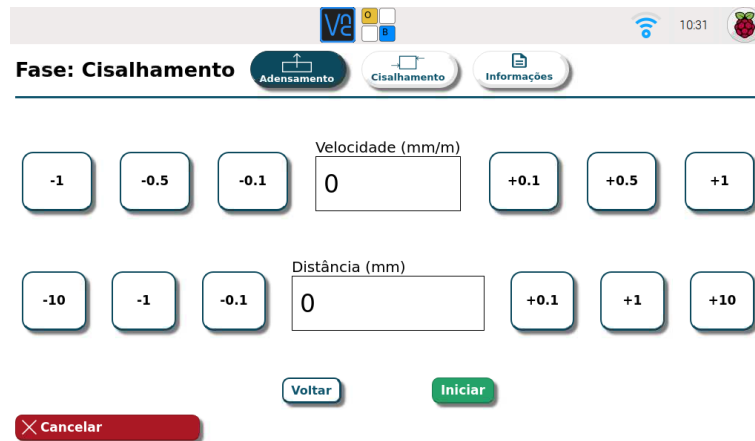
Fonte: De autoria própria

6.2.1.4 Fase de Cisalhamento

O início da fase de cisalhamento se dá na tela de definição dos parâmetros do movimento que resultará na tensão de cisalhamento que será aplicada na amostra. Como

mostra a Figura 59, o usuário pode definir a velocidade do movimento do carrinho, que varia de 0.001 mm [$0.00004''$] a 3.8 mm [$0.15''$] por minuto e o deslocamento (de 0.1 mm [$0.004''$] a 20.3 mm [$0.8''$]) do mesmo a partir de alguns botões que permitem o ajuste positivo ou negativo.

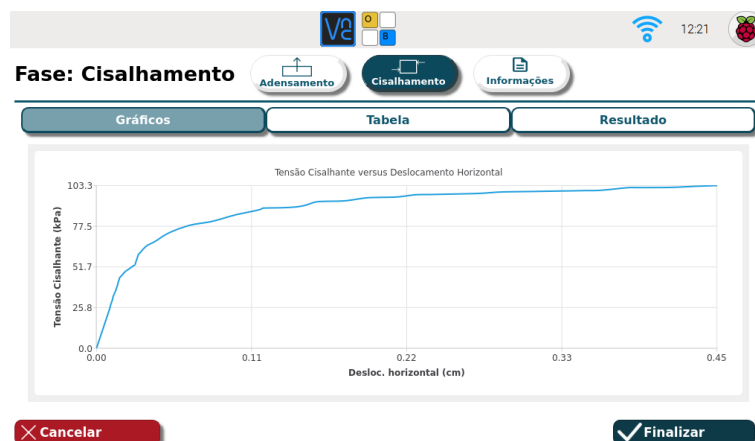
Figura 59 – Tela de definição dos parâmetros de cisalhamento



Fonte: De autoria própria

Ao pressionar o botão de iniciar o movimento, é enviado um comando de modelo $MP \ O=0 \ A=100 \ V=vel \ P=pos \ G$ que aciona o modo de posição do motor, em que vel corresponde ao valor de velocidade e pos ao valor de deslocamento definidos pelo usuário. Dessa forma, o servo motor imprime um movimento conforme os parâmetros definidos sobre a amostra.

Figura 60 – Tela da Fase de Cisalhamento - Gráfico

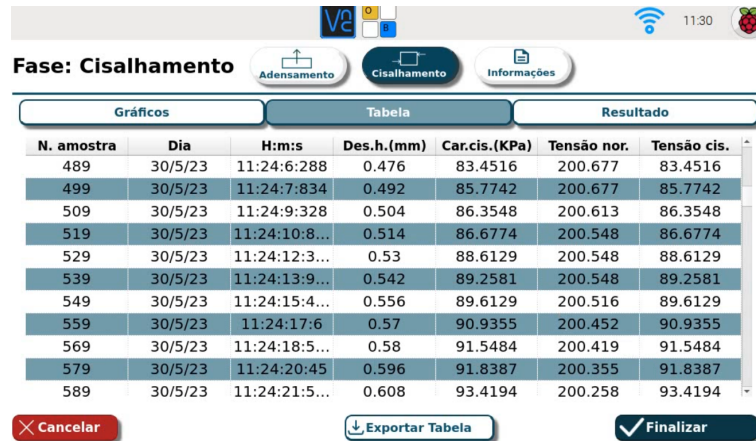


Fonte: De autoria própria

Assim que se dá o início do movimento, o *buzzer* emite um sinal sonoro indicando o início do movimento e é apresentada uma tela, Figura 60, (Gráfico) com um gráfico de

Tensão Cisalhante *versus* Deslocamento Horizontal. Há, também, uma segunda tela (Tabela), Figura 61, com uma tabela com os dados dos sensores de carga e de deslocamento e uma terceira tela (Resultados), Figura 62, que exibe os resultados do cálculo de algumas variáveis, como carga de cisalhamento final, tensão normal máxima e deslocamento horizontal total. Todas essas telas são atualizadas em tempo real, com os dados do ensaio.

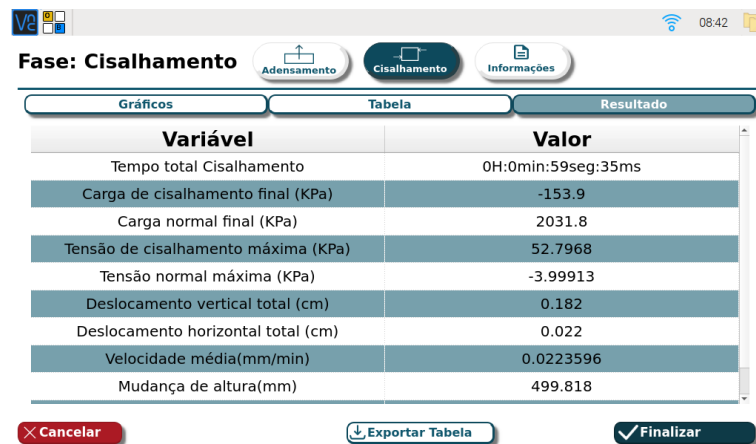
Figura 61 – Tela da Fase de Cisalhamento - Tabela



N. amostra	Dia	H:m:s	Des.h.(mm)	Car.cis.(KPa)	Tensão nor.	Tensão cis.
489	30/5/23	11:24:6:288	0.476	83.4516	200.677	83.4516
499	30/5/23	11:24:7:834	0.492	85.7742	200.677	85.7742
509	30/5/23	11:24:9:328	0.504	86.3548	200.613	86.3548
519	30/5/23	11:24:10:8...	0.514	86.6774	200.548	86.6774
529	30/5/23	11:24:12:3...	0.53	88.6129	200.548	88.6129
539	30/5/23	11:24:13:9...	0.542	89.2581	200.548	89.2581
549	30/5/23	11:24:15:4...	0.556	89.6129	200.516	89.6129
559	30/5/23	11:24:17:6	0.57	90.9355	200.452	90.9355
569	30/5/23	11:24:18:5...	0.58	91.5484	200.419	91.5484
579	30/5/23	11:24:20:45	0.596	91.8387	200.355	91.8387
589	30/5/23	11:24:21:5...	0.608	93.4194	200.258	93.4194

Fonte: De autoria própria

Figura 62 – Tela da Fase de Cisalhamento - Resultados



Variável	Valor
Tempo total Cisalhamento	0H:0min:59seg:35ms
Carga de cisalhamento final (KPa)	-153.9
Carga normal final (KPa)	2031.8
Tensão de cisalhamento máxima (KPa)	52.7968
Tensão normal máxima (KPa)	-3.99913
Deslocamento vertical total (cm)	0.182
Deslocamento horizontal total (cm)	0.022
Velocidade média(mm/min)	0.0223596
Mudança de altura(mm)	499.818

Fonte: De autoria própria

Nesta etapa também há a opção para exportar os dados desta fase do experimento. Esse procedimento, como mencionado, será abordado na Seção 6.2.4.

6.2.2 Integração

A integração entre o *software* de alto nível (interface) e o *software* de baixo nível foi implementada através da correção das configurações dos *sockets* locais e da padronização dos dados de envio e recebimento. Essa comunicação se dá a partir de dois *sockets*, um no

qual o baixo nível atua como cliente e a interface como servidor e outro em que o baixo nível atua como servidor e a interface como cliente.

A interface é responsável por enviar os comandos (de 0 a 6) e os parâmetros como velocidade e *setpoint* de carga e o baixo nível por executar as rotinas definidas pelos comandos recebidos e enviar os dados dos sensores para a sua exibição para o usuário na interface. Os comandos e os dados enviados foram estruturados, para melhor entendimento, na Tabela 9.

Tabela 9 – Lista de comandos

Comando	Parâmetros	Descrição do Parâmetro	Atividade
0	<i>enabled</i> <i>area</i>	Habilitado = 1; Desabilitado = 0 Área da amostra em cm^2	Habilita ou pausa a leitura e o envio dos dados Transmite o valor da área para o cálculo da carga
1	<i>velocity</i>	Velocidade do servo motor	Aciona o modo de velocidade do servo motor
2	-	-	Ativa e desativa a baixa pressão
3	<i>setpoint</i>	Valor desejado de carga normal	Ativa o controle de pressão/carga
4	<i>distance</i> <i>velocity</i>	Deslocamento do servo motor Velocidade do servo motor	Aciona o modo de posição do servo motor
5	-	-	Cancela ou finaliza o experimento
6	-	-	Aciona a exportação dos dados para um PenDrive

Fonte: De autoria própria

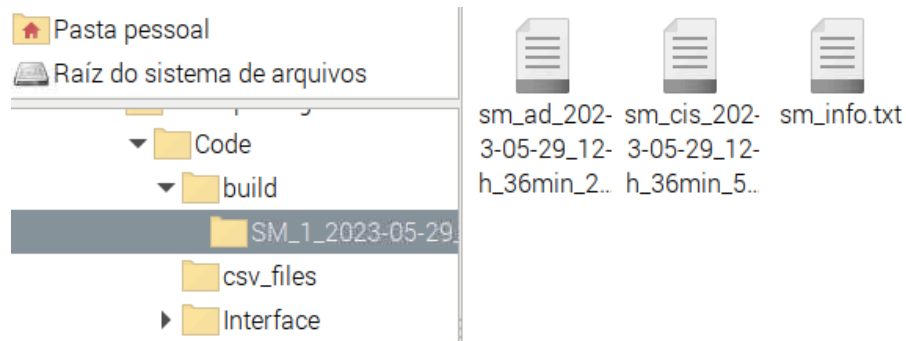
6.2.3 Tratamento dos Dados

Os dados envolvidos no experimento que são lidos pelos sensores são armazenados em arquivos para a sua posterior análise por parte do usuário. Os dados são registrados em arquivos *.csv* (*Comma-Separated Values* - Valores Separados Por Vírgula) separados por ponto e vírgula, pois tal extensão de arquivos pode ser facilmente manipulada em *softwares* editores de planilhas.

Foi desenvolvida uma padronização para o armazenamento de tais dados. Como está sendo utilizado, por padrão, um tempo de amostragem da leitura dos sensores de 100 *ms* e um ensaio de cisalhamento direto pode durar horas, os dados estão sendo armazenados não nesse mesmo tempo de amostragem, mas sim em intervalos de 2 segundos. Tal estratégia foi utilizada em observância às Normas Internacionais D3080 (ASTM, 2011) e D2435 (ASTM, 2002), a fim de reduzir o tamanho dos arquivos gerados.

Com o objetivo de organizar os arquivos gerados e não incorrer em risco de perda de dados, o sistema abre um novo diretório de arquivos a cada experimento, tendo como nome o padrão *sm_NúmeroDoExperimento_Ano_Mês_Dia_Hora_Minutos* (Figura 63), em que "sm" representa o vocábulo em inglês *Shear Machine* (Máquina de Cisalhamento), "NúmeroDoExperimento" representa o número do experimento atual e as demais informações sobre data e hora dizem respeito ao horário de abertura do diretório.

Figura 63 – Estrutura das pastas e arquivos



Fonte: De autoria própria

Dentro do diretório, como pode ser visto na Figura 63, são abertos um arquivo com os dados da fase de adensamento iniciado em "sm_ad" e um arquivo com os dados da fase de cisalhamento iniciado em "sm_cis", ambos seguindo o padrão de nomenclatura das pastas, porém, sem a especificação do número do experimento e com o acréscimo do tempo em segundos em que foi aberto o arquivo. Vale ressaltar que, visando novamente um bom gerenciamento do tamanho dos arquivos, a cada 1000 amostras é aberto um novo arquivo com mesmo nome, porém com o novo horário de abertura. Em ambos os arquivos são armazenados os valores de Tempo, Força Normal, Carga Normal, Deslocamento Vertical, Força Cisalhante, Carga Cisalhante e Deslocamento Horizontal (Figura 64).

Figura 64 – Exemplo do arquivo de dados da fase de adensamento

ID	Tempo	Força Normal (N)	Carga Normal (kPa)	Deslocamento Vert. (mm)	Força Cisalhante (N)	Carga Cisalhante (kPa)	Deslocamento Horiz. (mm)
8	09:18:34.1	531.70	171.52	0.080	-12.30	-3.97	0.004
9	09:18:35.7	556.50	179.52	0.080	-12.40	-4.00	0.004
10	09:18:37.2	554.70	178.94	0.080	-12.40	-4.00	0.004
11	09:18:38.7	555.40	179.16	0.078	-12.40	-4.00	0.004
12	09:18:40.3	556.00	179.35	0.108	-12.50	-4.03	0.004
13	09:18:41.8	583.00	188.06	0.266	-12.70	-4.10	0.004
14	09:18:43.3	671.60	216.65	0.302	-13.00	-4.19	0.004
15	09:18:44.9	735.70	237.32	0.308	-13.20	-4.26	0.004
16	09:18:46.4	744.60	240.19	0.322	-13.40	-4.32	0.004
17	09:18:47.9	772.40	249.16	0.326	-13.40	-4.32	0.004

Fonte: De autoria própria

Nas telas iniciais da interface há alguns campos disponíveis para o usuário preencher com informações sobre o experimento. Essas informações, juntamente com os resultados calculados nas fases de adensamento e de cisalhamento são gravadas, também, em um arquivo de texto na pasta do ensaio atual chamado "sm_info" (Figura 65).

Figura 65 – Exemplo do arquivo de informações do ensaio

```
Numero do experimento: Experimento 10
Operador: matheus
Data e hora de inicio: 23/5/2023 9H:18min:32seg:312ms
Data e hora de exportacao: 23/5/23 9:47:43:701
Tipo do teste: Teste do tipo 0000
Tipo de espécime: Espécime do tipo 0000
Classe USCS: Cla uscs 0000
Classe ASHTO: Clae ashto 0000
Preparacoes da amostra: Nenma preparação
ID da amostra: 456
Numero de furos: 21
Localizacao da amostra: Locação da amostra
Descricao da amostra: Descrição da amostra
Altura inicial (cm): 5
Peso umido inicial (g): 8
Umidade inicial (%): 2
Massa especifica dos solidos (g/cm3): 3
Limite de plasticidade (%): 4
Limite de liquidez (%): 12
Posicao inicial (cm): 0
Diametro (cm): 6.3
Carga Normal (kPa): 31.1715
Area (cm2): 155.858
Volume inicial (cm3): 1246.86
```

Fonte: De autoria própria

Vale ressaltar, nesta etapa, que há a implementação de um banco de dados estruturado no *software* de alto nível que, neste trabalho, não foi possível ser integrada com as funcionalidades desenvolvidas.

6.2.4 Exportação dos Dados

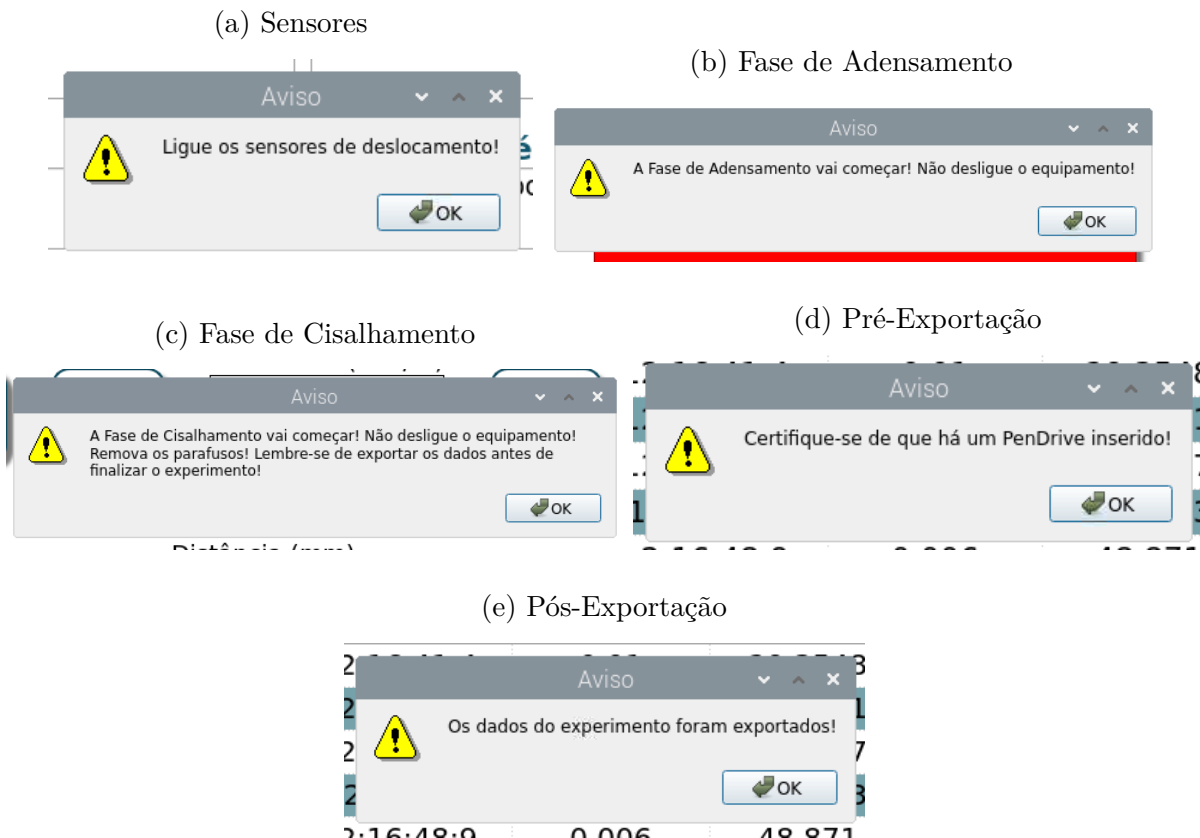
Nas fases de adensamento e de cisalhamento o usuário tem a opção de apertar um botão para exportar os dados do experimento. Essa exportação é implementada a partir de uma função chamada *gravarPenDrive()* que reconhece se há algum PenDrive inserido na porta USB do painel da máquina e, caso haja, copia o diretório criado com todos os arquivos do experimento atual para este PenDrive. Dessa forma, o usuário tem acesso completo aos dados devidamente tratados das leituras dos sensores e demais dados relevantes ao ensaio.

6.2.5 Avisos ao Usuário

A fim de garantir o uso correto e intuitivo do sistema por parte do usuário, foram implementadas algumas telas de aviso, contendo informações sobre procedimentos necessários e alertas durante os ensaios. Os avisos foram estruturados da seguinte forma:

- Aviso dos Sensores (Figura 66a): ao iniciar o sistema, um aviso aparece ao usuário o informando sobre a necessidade de ligar os sensores de deslocamento antes de prosseguir com a utilização do equipamento.
- Aviso da Fase de Adensamento (Figura 66b): ao clicar para iniciar a fase de adensamento, um aviso aparece ao usuário o informando sobre a importância de não desligar o equipamento durante essa fase.
- Aviso da Fase de Cisalhamento (Figura 66c): ao clicar para iniciar a fase de cisalhamento, um aviso aparece ao usuário o informando sobre a importância de não desligar o equipamento durante essa fase, de retirar os parafusos de fixação do contêiner e de exportar os dados antes de finalizar o ensaio.
- Aviso Pré-Exportação (Figura 66d): ao clicar no botão de exportação de dados, um aviso aparece ao usuário para que este se certifique de que haja um PenDrive inserido para a exportação.
- Aviso Pós-Exportação (Figura 66e): após inserir um PenDrive e prosseguir, um aviso aparece ao usuário o informando que a exportação foi realizada.

Figura 66 – Telas de Aviso



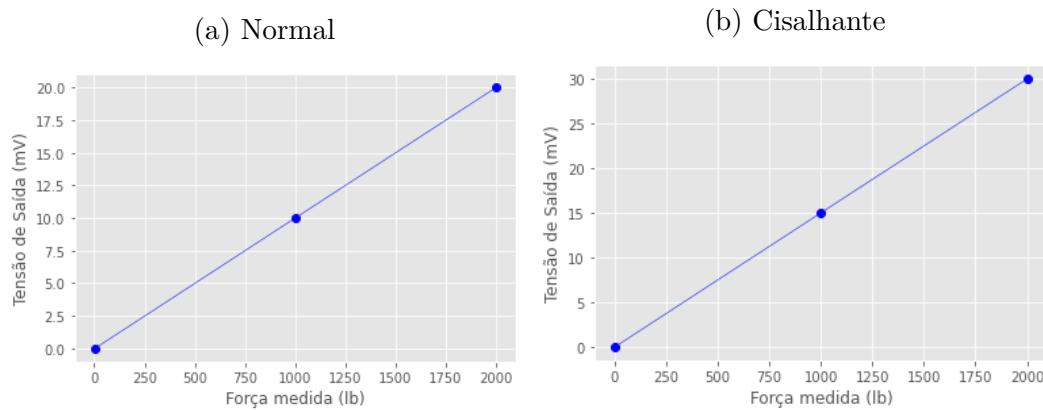
Fonte: De autoria própria

6.3 Configuração das Células de Carga

Para a análise correta dos ensaios e consequentes resultados deste projeto, houve a necessidade de correção na configuração das células de carga, que estavam sem unidade de medida definida. Para isso, primeiramente, foram levantados os dados para a elaboração dos gráficos com a relação Carga *versus* Tensão de ambas as células.

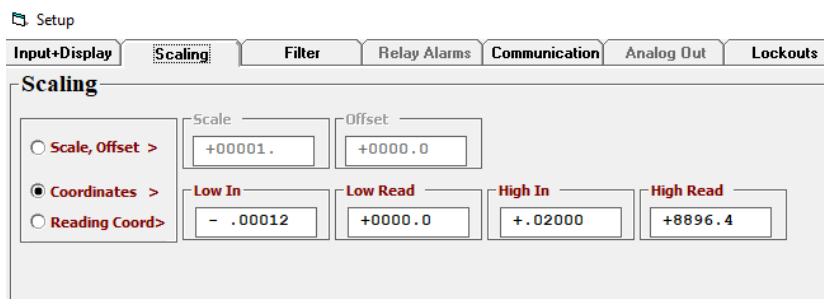
A célula de carga normal (Figura 16a) tem uma sensibilidade de 2 mV/V e a de cisalhamento tem sensibilidade de 3 mV/V . As duas possuem alimentação de 10 V e capacidade de 2.000 lb . Conhecendo a sensibilidade, pode-se definir o intervalo de saída como sendo a sensibilidade multiplicada pela tensão de alimentação (20 mV - Carga Normal, 30 mV - Carga Cisalhante). Com esses dados foram elaborados os gráficos das Figuras 67a e 67b que apresentam os intervalos de operação das células.

Figura 67 – Relação Carga x Tensão das Células de Carga



Fonte: De autoria própria

Figura 68 – Tela do *software* de configuração das células de carga



Fonte: (LAUREL, 2022)

Após a definição dos intervalos de operação, foi utilizado o *software* de configuração do fabricante dos painéis de medição das células de carga para efetuar a calibragem dos sensores. A Figura 68 exibe a tela desse *software* que é utilizada para definir os valores de

mínimo e de máximo (da tensão de saída da célula de carga e da medição equivalente) de atuação dos sensores. A configuração utilizada nessa figura, em unidades internacionais (Newton), corresponde ao valor de *offset* medido, representando a medida de carga 0 *N* e o valor máximo de saída, representando a medida de carga 8896.4 *N* (= 2000 *lbf*). Assim que esses pontos são definidos no *software*, ele traça uma reta que os interliga, representando todos os valores possíveis de entrada e medição.

Após a configuração dos dois sensores utilizando esse método, foram registrados alguns dados de teste para a análise da eficácia dessa calibragem. O método utilizado para os testes foi a aplicação gradual de discos com pesos conhecidos (de 4 e 8 *kg*) sobre as células (Figura 69) e a verificação dos valores medidos, em comparação com os valores esperados.

Figura 69 – Teste de Configuração das Células de Carga



Fonte: De autoria própria

Tabela 10 – Resultados da configuração da célula de carga normal

Peso (kgf)	Valor Esperado (N)	Valor Obtido (N)	Erro (%)
0	0	0	0
8	78.45	78.3	0.19
32	313.81	310.8	0.95
48	470.71	468	0.57

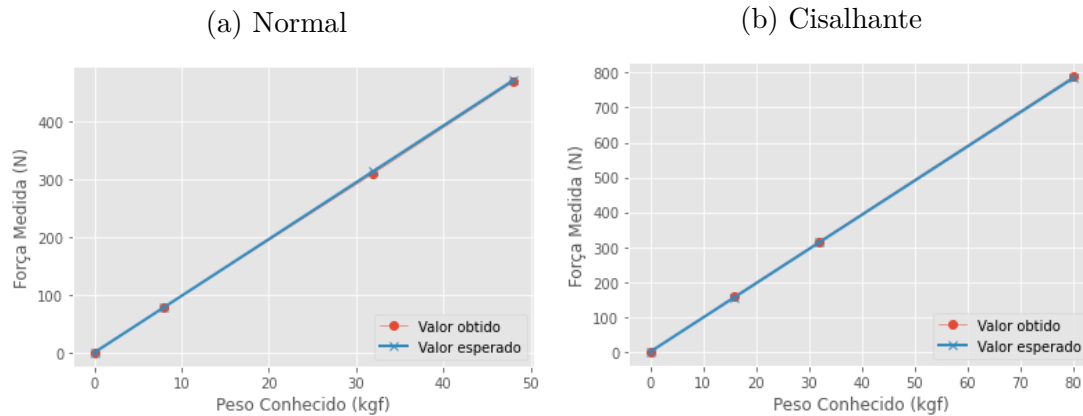
Fonte: De autoria própria

Tabela 11 – Resultados da configuração da célula de carga cisalhante

Peso (kgf)	Valor Esperado (N)	Valor Obtido (N)	Erro (%)
0	0	0	0
16	156.9	158.4	0.95
32	313.81	316.4	0.82
80	784.53	788.6	0.52

Fonte: De autoria própria

Figura 70 – Análise de Linearidade das Células de Carga



Fonte: De autoria própria

Observando as Tabelas 11 e 11, com os dados obtidos nas medições, e os gráficos das Figuras 70a e 70b, representando o comportamento linear dos sensores, conclui-se que a configuração foi feita adequadamente, respeitando os padrões estabelecidos para dispositivos de medição de força para máquinas de teste pela Norma Internacional ASTM E4 (ASTM, 2015), que define uma tolerância de $\pm 1\%$ de erro de medição.

Portanto, as medições de força são feitas em Newton e, no sistema embarcado, são convertidas para unidades de carga, mais utilizadas em ensaios de cisalhamento direto. Está sendo utilizada, para carga, a unidade de kPa . A conversão é feita, primeiramente, dividindo-se a força pela área do plano de recorte da amostra. Assim, têm-se a carga em N/cm^2 , que, multiplicada por um fator 10 é convertida para kPa . A conversão segue as relações a seguir:

$$Carga = \frac{Força}{Área} \quad (6.4)$$

$$Carga_{[kPa]} = 10 * Carga_{[N/cm^2]} \quad (6.5)$$

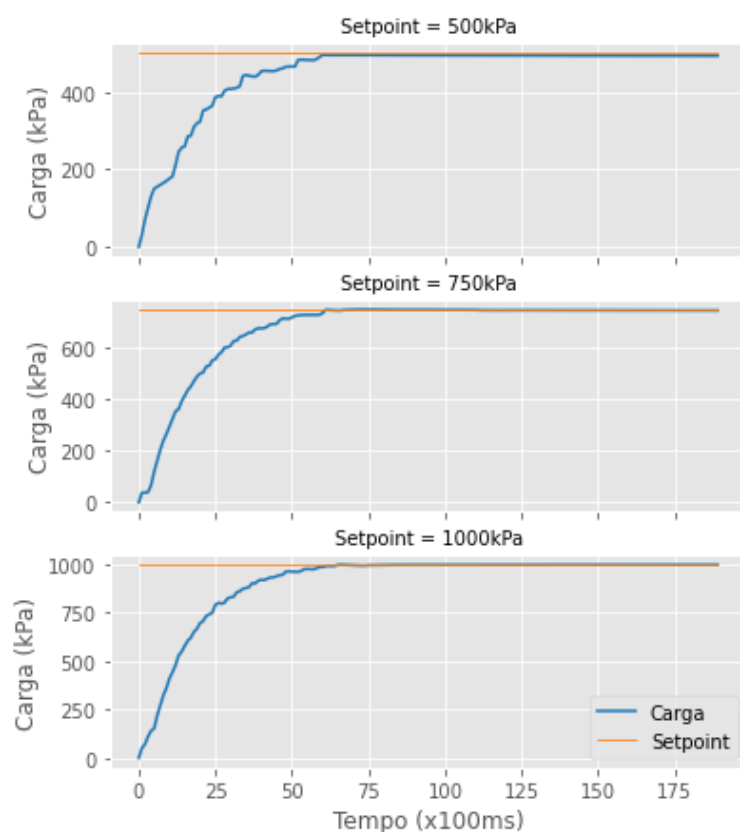
6.3.1 Atualização do Sistema de Controle

Com o ajuste das unidades de medida das células de carga, foi necessário atualizar os coeficientes do sistema de controle pneumático, pois o processo de normalização da entrada do controlador estava incorreto em razão da indefinição da unidade de medida. A mudança dos intervalos de operação da carga resultou na necessidade de corrigir os ganhos do controlador PI para manter o padrão de qualidade apresentado na Seção 6.1.2.

Para isso, o controlador foi ajustado a partir de testes e readequações nos valores dos ganhos por conta da mudança dos valores dos intervalos. Foram definidas cinco faixas de atuação do controlador, apresentadas na Tabela 12. A opção por esses intervalos se

justifica no fato de que o controlador atua melhor em cada faixa com uma combinação de ganhos específica. Assim, os ganhos do controlador dependem do intervalo ao qual o *setpoint* de carga definido pelo usuário se encontra.

Figura 71 – Gráficos do Controle PI Atualizado



Fonte: De autoria própria

Tabela 12 – Faixas de operação do controlador PI

Intervalo de Carga (N)	Ganho Proporcional (Kp)	Ganho Integral (Ki)
$setpoint < 275$	0.09	0.006
$275 \geq setpoint < 400$	0.09	0.005
$400 \geq setpoint < 500$	0.09	0.004
$500 \geq setpoint < 750$	0.09	0.0025
$750 \leq setpoint$	0.09	0.0015

Fonte: De autoria própria

Utilizando essa configuração, o usuário define a carga normal de *setpoint* em *kPa* e o sistema realiza o controle de pressão baseado nos valores de força em *N* medidos. Definindo, como amostra, três *setpoints*: 500 *kPa*, 750 *kPa* e 1000 *kPa*, obtiveram-se os gráficos da Figura 71. A partir desses gráficos, constata-se o comportamento conforme o desejado: um sistema criticamente amortecido. A partir da Tabela 13, observa-se um

tempo de estabelecimento médio de cerca de 6 segundos e os erros médios e sobre-impulsos que estão em acordo com as normas, como na Seção 6.1.2.

Tabela 13 – Resultados da análise do controlador

<i>Setpoint</i> de Carga (kPa)	Tempo de Estabelecimento (s)	Erro Médio (%)	Sobre-impulso (%)
500	6,0	0,97	0,88
750	6,1	0,69	0,39
1000	6,1	0,33	0,22

Fonte: De autoria própria

6.4 Ensaios de Cisalhamento Direto

Para a obtenção de resultados significativos em contextos reais da utilização da máquina de cisalhamento direto, foram realizados alguns testes representativos do uso habitual do equipamento. Os resultados desses testes e sua análise serão apresentados a seguir.

6.4.1 Preparo da Amostra

A primeira etapa do ensaio foi o preparo da amostra a ser testada. O material utilizado foi areia quartzosa, uniforme, de granulometria média a fina (diâmetros entre 0.075 e 2 mm). Tal material pode ser visto na Figura 72.

Figura 72 – Amostra de quartzo utilizada nos testes

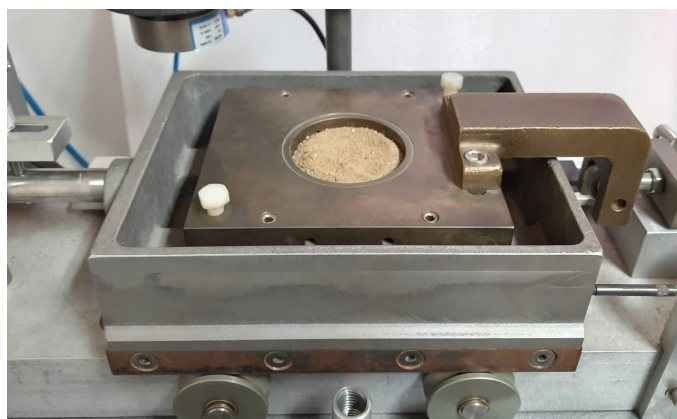


Fonte: De autoria própria

Após realizar o alinhamento do carrinho de cisalhamento e fixá-lo com os parafusos de fixação, representando a posição inicial, a amostra foi então inserida dentro do espaço cilíndrico no contêiner do equipamento (Figura 73).

Uma vez alocada a amostra, a máquina está pronta (Figura 74) para ser inicializada e configurada, para que o experimento seja iniciado.

Figura 73 – Contêiner com a amostra



Fonte: De autoria própria

Figura 74 – Máquina com a amostra pronta para o ensaio



Fonte: De autoria própria

6.4.2 Configurações Iniciais

Uma vez preparada a amostra, os próximos passos são: ligar a máquina, girar a válvula manual de fornecimento de pressão e, após inicializado o *software* na tela, ligar os sensores de deslocamento manualmente.

Assim que a máquina é ligada, o sistema é inicializado automaticamente e a primeira tela apresentada é a **Etapa 1**. Juntamente com as telas da **Etapa 2** e da **Etapa 3**, o usuário pode definir informações do experimento e pode definir os parâmetros da

amostra de solo utilizada. As configurações utilizadas no teste foram as representadas nas Figuras 75, 76 e 77.

Figura 75 – Etapa 1 - Ensaio de Cisalhamento Direto

Fonte: De autoria própria

Figura 76 – Etapa 2 - Ensaio de Cisalhamento Direto

Fonte: De autoria própria

Na Figura 77 pode ser visto que a carga normal é definida pelo usuário nessa etapa. A carga utilizada nos ensaios foi definida no valor de 250 kPa . Após a definição desses parâmetros o sistema calcula e armazena alguns dados, a saber: área, volume inicial, massa específica úmida, massa específica seca, índice de vazios, peso específico da água e a saturação inicial da amostra.

As últimas etapas antes do início do ensaio propriamente dito já foram explanadas nas Seções 6.2.1.1 e 6.2.1.2, e são:

- Ajuste da posição inicial: nessa etapa é feito um ajuste fino da posição do carrinho de cisalhamento que é mais difícil de ser realizado manualmente através do volante do equipamento.

Figura 77 – Etapa 3 - Ensaio de Cisalhamento Direto

Fonte: De autoria própria

- Ativação da baixa pressão: nessa etapa o pistão de baixa pressão é acionado aplicando uma baixa carga sobre a amostra. É nessa etapa que os dados dos sensores e das células de carga referentes ao ensaio começam a ser gravados para posterior exportação.

6.4.3 Fase de Adensamento

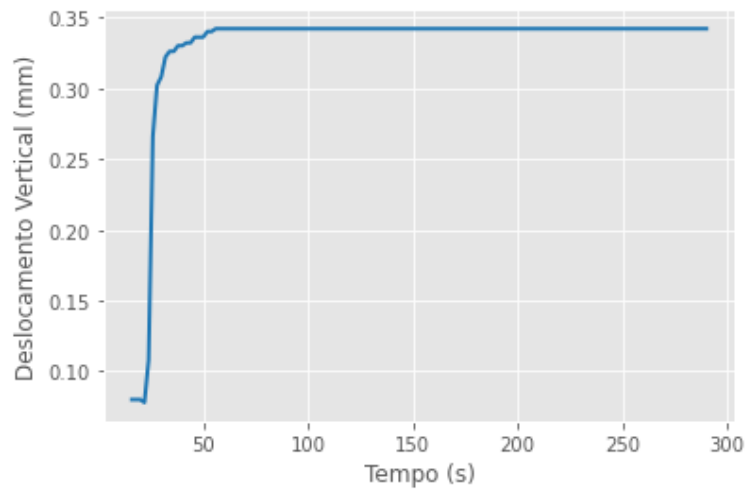
Ao iniciar a fase de adensamento é iniciado o controle de carga através da pressão do pistão de alta pressão e os resultados são visíveis ao usuário. Uma vez que tais resultados foram detalhados na Seção 6.2.1.3, incluindo o gráfico, a tabela com os dados e os resultados calculados, nesta Seção serão apresentados a tela com os resultados desta fase (Figura 78), incluindo a carga normal aplicada (250 kPa) e a variação de altura (0.338 mm) e um gráfico de Deslocamento Vertical *versus* Tempo, obtido com os dados exportados via *PenDrive* (Figura 79).

Figura 78 – Resultados da Fase de Adensamento - Ensaio de Cisalhamento Direto

Variável	Valor
Tempo Total Adensamento	0H:5min:55seg:212ms
Leitura da carga final (KPa)	250.225
Altura final (mm)	0.34
Mudança de altura (mm)	0.338
Volume Final adensamento (cm³)	156.84

Fonte: De autoria própria

Figura 79 – Gráfico da Fase de Adensamento - Ensaio de Cisalhamento Direto



Fonte: De autoria própria

A fase de adensamento foi realizada por cerca de 6 minutos, até a observação da estabilização da amostra. Dessa forma, ressalta-se a relevância do gráfico (Figura 56) que é exibido ao usuário para a melhor compreensão do comportamento do ensaio em tempo real, tornando possível acompanhar o que está acontecendo com a amostra. Máquinas que não possuem qualquer tipo de apresentação em tempo real desses dados dificultam a interpretação do usuário.

6.4.4 Fase de Cisalhamento

Uma vez estabilizada a amostra na fase de adensamento, foi iniciada a fase de cisalhamento. O primeiro passo nessa fase é a definição dos parâmetros de cisalhamento na tela da Figura 59. Foram definidos, então, os seguintes parâmetros para o cisalhamento da amostra:

- Velocidade: 0.5 *mm/min*
- Distância: 12 *mm*

Com esses parâmetros, esperava-se obter um deslocamento horizontal total igual a 12 *mm* e um tempo total de cisalhamento de pouco mais de 24 *min* devido à velocidade constante de 0.5 *mm/min*, levando-se em consideração a aceleração inicial de 80% até atingir a velocidade definida. Com a análise dos dados, observou-se um deslocamento total de 12.046 *mm*, apresentando um erro de 0.38% e um tempo total final de cisalhamento de 25 *min*. Esses valores podem ser vistos na tela de resultados, na Figura 80.

Figura 80 – Resultados da Fase de Cisalhamento - Ensaio de Cisalhamento Direto

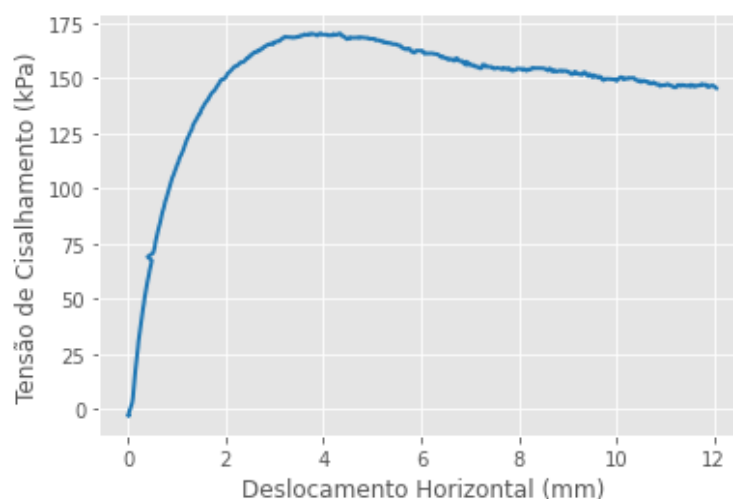
Fase: Cisalhamento Adensamento Cisalhamento Informações

Variável	Valor
Tempo total Cisalhamento	0H:25min:01seg:546ms
Carga de cisalhamento final (KPa)	145.194
Carga normal final (KPa)	251.806
Tensão de cisalhamento máxima (KPa)	171.806
Tensão normal máxima (KPa)	252.156
Deslocamento vertical total (cm)	0.344
Deslocamento horizontal total (cm)	12.046
Velocidade média(mm/min)	0.50599

Cancelar Exportar Tabela Finalizar

Fonte: De autoria própria

Figura 81 – Gráfico da Fase de Cisalhamento - Ensaio de Cisalhamento Direto



Fonte: De autoria própria

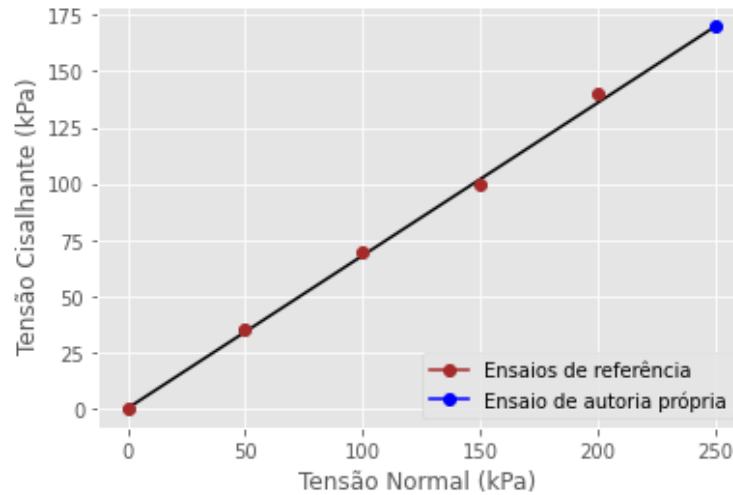
Tomando os dados exportados, foi obtido o gráfico da Figura 81 de Tensão de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal da amostra. A partir desse gráfico e dos dados exportados, observa-se a tensão de cisalhamento máxima em 171 *kPa*, um dado importante para a descrição do comportamento da amostra.

6.4.5 Análise dos Resultados

Para a análise dos resultados do ensaio de cisalhamento direto realizado, foram utilizados o mesmo material e os mesmos parâmetros que Pires (2021). Com os dados de Pires (2021) de ensaios utilizando o mesmo tipo de amostra para cargas normais iguais a 50 *kPa*, 100 *kPa*, 150 *kPa* e 200 *kPa* e com os dados da tensão normal (250 *kPa*) e da tensão máxima de cisalhamento do ensaio executado foi elaborado o gráfico da Figura 82.

Esse gráfico valida o resultado obtido a partir da análise da linearidade da relação Tensão Normal *versus* Tensão Cisalhante da amostra em diferentes valores de cargas.

Figura 82 – Comparação dos Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto



Fonte: De autoria própria

Portanto, observa-se que os ensaios realizados por intermédio da Máquina GE-OTEST de Cisalhamento Residual Direto e do sistema embarcado de monitoramento e controle desenvolvido neste projeto apresentam resultados consistentes e em conformidade com as normas e procedimentos padrão.

6.5 Teste de Usabilidade

Após a realização de alguns ensaios de cisalhamento utilizando a máquina, foram realizados alguns testes de usabilidade da mesma, para, assim, observar a operação do equipamento por usuários reais, a fim de descobrir falhas e pontos de melhoria. Os pontos levantados foram os seguintes:

- Necessidade de correção: mudança do gráfico da fase de cisalhamento de Deslocamento Horizontal *versus* Deslocamento Vertical para um gráfico de Tensão Cisalhante *versus* Deslocamento Horizontal. Tal mudança foi implementada e pode ser vista na Figura 60.
- Necessidade de correção: revisão nos cálculos dos parâmetros da amostra de solo: massa específica úmida, massa específica seca, índice de vazios e saturação inicial. Tal correção foi implementada.
- Ponto positivo: os avisos ao usuário facilitaram a utilização do equipamento e evitaram erros e falhas.

- Sugestão de futura melhoria: permitir ao usuário a opção de realizar incrementos de carga durante a execução do experimento.
- Sugestão de futura melhoria: permitir o descarregamento gradual da carga sobre a amostra.
- Sugestão de futura melhoria: exibir o tempo do gráfico da fase de adensamento em escala logarítmica.

6.6 Documentação e Manuais

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes à documentação do código e à documentação de uso do equipamento, tanto para o usuário quanto para manutenção.

6.6.1 Documentação do Código

Os códigos de todo o sistema embarcado desenvolvido, incluindo outros arquivos importantes, podem ser acessados nos repositórios *online*:

- Baixo Nível: <https://github.com/UnB-Infralab/infralab_direct_shear_embedded>
- Alto Nível: <https://github.com/UnB-Infralab/infralab_direct_shear_embedded_interface>

A documentação do código de baixo nível foi feita utilizando o *software* Doxygen v.1.9.7 (DOXYGEN, 2022), um *software* gerador de documentação compatível com algumas linguagens de programação, dentre elas as linguagens C e C++. O programa gera arquivos em HTML e .PDF com as informações a respeito do código. Nesses arquivos é intuitivo identificar a estrutura do código, os objetivos de cada função e seus parâmetros e as descrições das variáveis e constantes utilizadas.

Esses documentos podem ser acessados através da pasta **Documentação** do repositório, no *link*: <https://github.com/UnB-Infralab/infralab_direct_shear_embedded/tree/main/Documenta%C3%A7%C3%A3o>.

6.6.2 Manuais

Foram desenvolvidos dois manuais para a utilização da máquina de cisalhamento direto após o processo de *retrofit* desenvolvido. A saber:

- Manual do Usuário: contendo descrições gerais do equipamento, instruções acerca do procedimento de utilização e notas informativas. O objetivo deste documento é informar o usuário e facilitar a utilização da máquina por sua parte.

- Manual Técnico do Sistema Embarcado: contendo informações a respeito do processo de instalação do sistema, organização e estrutura dos códigos e informações sobre o funcionamento geral. O objetivo deste documento é reunir as informações operacionais sobre o funcionamento do sistema embarcado e fornecer as orientações para eventuais necessidades de correção de erros e falhas.

Os dois documentos citados podem ser acessados através da pasta **Manuais** do repositório, no *link*: <https://github.com/UnB-Infralab/infralab_direct_shear_embedded/tree/main/Manuais>.

6.6.3 Vídeo Demonstrativo

No Manual do Usuário há um *link* para o acesso a um vídeo demonstrativo e instrutivo do funcionamento da máquina de cisalhamento. O vídeo pode ser acessado através do *link*: <https://unbbr-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/guillermo_unb_br/EaPDrOfu3chFgGmUChzoBkIBh2-HipdUEUb5hURRdJFBjg?e=KDto9h>

7 Considerações Finais

No capítulo de introdução deste trabalho foi mencionada a justificativa e os objetivos gerais e específicos deste. O escopo deste trabalho envolve o levantamento de referencial teórico como embasamento para o projeto, a realização de testes para o desenvolvimento de uma proposta de solução que atenda ao objetivo geral e a apresentação de resultados que fundamentem o projeto desenvolvido.

Considerando o mencionado acima, foi cumprido o escopo do projeto, com a apresentação de embasamento teórico (Capítulo 2), a apresentação do equipamento original (Capítulo 3), a descrição dos desenvolvimentos anteriores ao projeto (Capítulo 4), a apresentação sistemática da proposta de solução baseada nas referências e testes realizados (Capítulo 5) e a apresentação dos resultados finais (Capítulo 6).

Foram, então, obtidos bons resultados, tendo em vista a necessidade de um primeiro momento de adaptação e ambientação em um projeto que foi realizado na continuidade de projetos anteriores e conta com o envolvimento de diferentes partes interessadas.

As etapas iniciais de entendimento e levantamento de propostas e requisitos foram elementos orientadores para o desenvolvimento do projeto, minimizando imprevistos e erros de planejamento.

As primeiras implementações e os primeiros testes realizados apresentaram resultados otimistas em relação à implementação final do trabalho. Os testes do controle pneumático evidenciaram uma melhora significativa junto à solução com a válvula proporcional. Os testes iniciais para a integração entre o *software* de alto nível e o de baixo nível evidenciaram a dificuldade de integrar dois sistemas desenvolvidos separadamente, porém apresentaram resultados promissores.

Esses resultados iniciais fortaleceram a proposta do projeto e serviram de base para sua implementação final. Assim, foram concretizadas a finalização do sistema de controle para o sistema pneumático e a integração entre os *softwares* de alto e baixo nível. Essas etapas implementadas permitiram a execução de alguns ensaios de cisalhamento direto como testes para a análise do sistema desenvolvido, simulando contextos reais de utilização do equipamento.

Os resultados finais alcançados neste trabalho evidenciam a relevância e importância deste projeto de *retrofit* da Máquina GEOTEST de Cisalhamento Residual Direto do Infralab na UnB, uma vez que apresentam uma solução personalizada, moderna e intuitiva para a realização de ensaios de solo em disciplinas e projetos de diversos cursos da UnB.

Observou-se, como fator limitador ao projeto, as limitações que foram definidas na implementação anterior da interface do usuário. Algumas necessidades de alteração nesta interface durante o desenvolvimento do trabalho foram executadas, porém, não foi possível elaborar a tela de *Histórico* dos ensaios.

Para melhorias futuras, indica-se, portanto, a elaboração dessa página de *Histórico* dos ensaios, a calibração das células de carga de forma mais precisa, a integração entre a funcionalidade de exportação de dados via *PenDrive* e o banco de dados utilizado no *software* de alto nível e a implementação das sugestões de melhoria identificadas nos testes de usabilidade com usuários reais descritas na Seção 6.5.

Por fim, tanto os objetivos específicos quanto o objetivo geral do trabalho e, ainda, melhorias extras foram concluídos, alcançando, dessa forma, as expectativas levantadas pela justificativa do projeto.

Referências

- ANIMATICS. *The Smart Motor™ User's Guide - Manual do Usuário*. Califórnia, EUA: Animatics Corporation, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- ARDUINO. *Arduino Board*. 2023. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2022. Citado na página 39.
- ASTM. *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. EUA: ASTM International, 2002. Citado na página 98.
- ASTM. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. EUA: ASTM International, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 42, 43, 70, 74, 91 e 98.
- ASTM. *Standard Practices for Force Verification of Testing Machines*. EUA: ASTM International, 2015. Citado na página 104.
- BAI, F.; LIU, S. Measurement of the shear strength of an expansive soil by combining a filter paper method and direct shear tests. Pensilvânia, EUA, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270544250_Measurement_of_the_Shear_Strength_of_an_Expansive_Soil_by_Combining_a_Filter_Paper_Method_and_Direct_Shear_Tests>. Acesso em: 4 de jan. de 2023. Citado na página 29.
- BAILEY, O. H. *Embedded Systems: Desktop Integration*. Texas, EUA: Wordware Publishing, Inc., 2005. Citado na página 41.
- BESTARD, G. *Sensor Fusion and Embedded Devices to Estimate and Control the Depth and Width of the Weld Bead in Real Time*. Tese de Doutorado — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2017. Citado na página 77.
- CAPUTO, H. P. *MECÂNICA DOS SOLOS E SUAS APLICAÇÕES*. 6th. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.
- CDI. *CDI "LOGIC®" SERIES GAGE TECHNICAL INTERFACE MANUAL - Manual*. Illinois, EUA: CDI - Chicago, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- CDI. *CDI Digital Indicator Electronic Gauge Catalog - Datasheet*. [S.l.]: CDI Chicago, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 64.
- DAS, B.; SOBHAN, K. *Principles of Geotechnical Engineering*. 9th. ed. Califórnia, EUA: Cengage, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 29, 35, 36 e 37.
- DOBBIN, I. *Desenvolvimento de Software com Interface Gráfica em Raspberry PI 4 para controle de uma máquina de cisalhamento*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade de Brasília, Faculdade do Gama, Brasília, Brasil, 2022. Citado 8 vezes nas páginas 29, 30, 32, 59, 65, 66, 69 e 85.

- DOXYGEN. *Versão 1.9.7. Copyright © 1997-2022 by Dimitri van Heesch.* 2022. Disponível em: <<https://www.doxygen.nl/>>. Acesso em: 10 de abr. de 2023. Citado na página 113.
- EMBARCADOS. *Curso Básico – Microcontrolador PIC – Parte 1.* 2023. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/curso-microcontrolador-pic-parte-1/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2023. Citado na página 39.
- FIORI, A. P. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.* São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2015. ISBN 978-85-7975-184-4. Citado na página 36.
- FRATTA, D.; AGUETTANT, J. *Introduction to Soil Mechanics Laboratory Testing.* Nova Iorque, EUA: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4562-8. Citado 5 vezes nas páginas 29, 35, 36, 37 e 38.
- FREDLUNG, D. G.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. Canadá, 1978. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/t78-029>>. Acesso em: 4 de jan. de 2023. Citado na página 29.
- GANSSE, J.; BARR, M. *Embedded Systems Dictionary.* Califórnia, EUA: CMP Books, 1971. Citado 4 vezes nas páginas 38, 39, 40 e 43.
- GEOTEST. *DESCRIPTION AND INSTRUCTIONS FOR GEOTEST DIRECT-RESIDUAL SHEAR MACHINE MODELS S2213A, S2215A S2216 - Datasheet.* Illinois, EUA: Geotest Instrument Corp., 2002. Citado 4 vezes nas páginas 49, 50, 56 e 57.
- INDUSTRY, D. *Microprocessador x64 Core™ i7 Extreme series.* 2023. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/intel/product-33710-194227.html>>. Acesso em: 10 de jan. de 2023. Citado na página 39.
- LAUREL. *Custom ASCII Protocol - SERIAL COMMUNICATIONS MANUAL - Manual.* Califórnia, EUA: LAUREL Electronics Inc., 2021. Disponível em: <<https://www.laurels.com/downloadfiles/serialcom2.pdf>>. Acesso em: 26 de jan. de 2023. Citado na página 53.
- LAUREL. *Laureate™ Digital Panel Meter for DC Voltage or Current - Datasheet.* [S.l.]: Laurel Electronics, INC., 2022. Disponível em: <<https://laurelsmexico.com/dcmeter.php>>. Acesso em: 19 de jan. de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 53, 64 e 102.
- MASTER. *Ficha Técnica VÁLVULA PROPORCIONAL.* São Paulo, Brasil: Master Tecnologia Industrial, 2021. Disponível em: <<https://www.mtibrasil.com.br/PDF/Valvula-Proporcional-EPV-2021.pdf>>. Acesso em: 23 de jan. de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 75.
- MATTOS, V. d. O. et al. UtilizaÇÃo da reengenharia, aliada a prototipagem, na manutenÇÃo de equipamentos laboratoriais da unesp – campus de guaratinguetÁ. São Paulo, Brasil, 2023. Disponível em: <<https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/793/634>>. Acesso em: 30 de jun. de 2023. Citado na página 29.
- MERCADOLIVRE. *Válvula Simples Solenoide 3/2 Vias Rosca 1/4 Escape 1/4 24v.* 2023. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-984340202-valvula-simples-solenoide-32-vias-rosca-14-escape-14-24v-_JM>. Acesso em: 19 de jan. de 2023. Citado na página 65.

- NISE, N. S. *Engenharia de sistemas de controle*. 6th. ed. EUA: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2013. Citado 5 vezes nas páginas 41, 42, 43, 45 e 46.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5th. ed. Nova Jersey, EUA: Prentice Hal, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 41, 42, 43, 44, 45, 46 e 65.
- OLIVEIRA, A. S. d.; ANDRADE, F. S. d. *Sistemas Embarcados - Hardware e Firmware na Prática*. São Paulo, Brasil: Editora Saraiva, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- PARK, C.; ALLABY, M. *A Dictionary of Environment and Conservation*. 2nd. ed. Inglaterra: Oxford University Press, 2013. Citado na página 47.
- PEREIRA, M. *Sistema embarcado para aquisição de dados e controle em ensaios de cisalhamento direto*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade de Brasília, Faculdade do Gama, Brasília, Brasil, 2021. Citado 12 vezes nas páginas 29, 31, 32, 49, 50, 53, 59, 60, 64, 65, 69 e 87.
- PIRES, A. C. G. *Estudo experimental do comportamento de tubos enterrados reforçados com geossintéticos*. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2021. Citado na página 111.
- RASPBERRYPI. *Raspberry Pi 4 Model B - Datasheet*. [S.l.]: Copyright Raspberry Pi (Trading) Ltd, 2019. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Acesso em: 15 de jan. de 2023. Citado na página 63.
- RASPBERRYPI. *Raspberry Pi - Products*. 2023. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/products/>>. Acesso em: 15 de jan. de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.
- TANENBAUM, A. S.; BOS, H. *Modern Operating Systems*. 4th. ed. Nova Jersey, EUA: Pearson Education, Inc., 2015. Citado na página 83.
- TEKTRONIX Oscilloscope. [S.l.]: TEKTRONIX, INC., 2023. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.