

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS DIVINÓPOLIS  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Alysson Aurélio de Azevedo Pereira

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA E SOFTWARES  
PARA UMA CÉLULA DE MANIPULAÇÃO ROBOTIZADA DE  
CUBOS



Divinópolis  
2021

Alysson Aurélio de Azevedo Pereira

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA E SOFTWARES  
PARA UMA CÉLULA DE MANIPULAÇÃO ROBOTIZADA DE  
CUBOS

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Eletrônica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Parreira Lopes



Divinópolis

2021

À MINHA FAMÍLIA E AMIGOS.

# Agradecimentos

Agradeço,

aos meus pais, Márcio e Fabiana, pelo apoio e confiança depositados em mim desde bem antes de ingressar no CEFET;

ao Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso, pelo incentivo e pela oportunidade de me manter sempre em contato com minha área favorita da engenharia. Na prática, ele foi meu orientador ao longo de todo o curso;

ao Prof. Dr. Cláudio Parreira Lopes, por toda a disposição, conselhos e esclarecimentos que tornaram este trabalho possível. Isso além da imensa contribuição para o desenvolvimento do projeto, por ter se disponibilizado a fabricar as peças da ferramenta;

aos Profs. Juliano Barros Veloso Lima e Lúcio Flávio Santos Patrício, por toda a ajuda e boas sugestões sobre o projeto mecânico do trabalho;

ao Prof. Emerson de Sousa Costa, pela permissão de acesso ao laboratório de robótica para a realização dos testes, mesmo com todas as complicações do contexto atual. A consistência dos resultados obtidos aqui só foi possível por esse motivo.

aos meus amigos Luan Bueno, Victor Coelho (Jesus), Ana Carolina e Thiago Vinícius, que estiveram presentes em todos os momentos nessa caminhada;

à minha namorada Rafaela por toda a força, paciência, carinho e amor, e por não me deixar desanimar nem por um segundo ao longo de todo o processo;

a todos que conviveram comigo durante minha formação no CEFET. Aqueles que me ofereceram sua amizade, respeito e atenção, e me fizeram me sentir acolhido por lá.

Houve uma época em que a humanidade encarava o universo sozinha, sem um amigo. Agora, o homem possui criaturas para ajudá-lo; criaturas mais fortes do que ele – mais fiéis, mais úteis e absolutamente devotadas a ele. A espécie humana já não está mais sozinha.

Isaac Asimov

## Resumo

A integração de máquinas e dispositivos em processos de manipulação robotizada é uma tendência do desenvolvimento tecnológico para o meio industrial atual. Um mesmo manipulador industrial é capaz de realizar uma ampla gama de trabalhos apenas com a mudança de sua ferramenta e sua programação, representando uma solução versátil de automação. No laboratório de robótica do CEFET-MG/ Unidade Divinópolis está disponível, como recurso de ensino e pesquisa, um robô Comau Smart5 SiX®. Tendo isso em vista, foi percebida a possibilidade de planejar e executar uma aplicação de manipulação. O presente trabalho teve como objetivo a complementação de uma célula robotizada, pelo projeto, construção e programação de uma ferramenta do tipo garra de dedos paralelos, compatível com o manipulador citado. Além disso, o desenvolvimento foi orientado de forma a possibilitar a realização de uma tarefa de empilhamento de cubos descrita em um trabalho anterior. Isso foi feito através de estudo teórico para o dimensionamento das peças, seguido da modelagem 3D, fabricação e montagem das mesmas. Foram produzidos os circuitos eletrônicos de acionamento e desenvolvidos os algoritmos de controle e comunicação. Com isso, foi possível produzir as folhas de detalhamento do projeto, além das listas de componentes, processos e custos para permitir a reprodução dos resultados obtidos. Em uma oportunidade presencial, foram feitos testes no laboratório de robótica para verificar o funcionamento da ferramenta na prática. A implementação das funções de controle em malha aberta de posicionamento e força de prensão apresentaram precisão adequada para a aplicação. Assim, foi obtida uma ferramenta versátil, de baixo custo e propósito geral, capaz de atender às especificações definidas e realizar plenamente sua função na tarefa de manipulação escolhida como referência. Entende-se que a ferramenta resultante do presente trabalho serve de suporte para o desenvolvimento de futuros trabalhos envolvendo a manipulação robótica integrada à visão computacional e à inteligência artificial aproveitando os recursos da controladora aberta disponível.

Palavras-chave: Projeto de Ferramenta, Manipulação Robotizada, Comau Smart5 SiX.

## Abstract

The integration of machines and devices in robotic manipulation processes is a trend of technological development, for the current industrial environment. The same industrial manipulator is capable of perform a wide range of tasks just by changing its tool and programming. This represents a versatile solution of automation. In the robotics laboratory of CEFET-MG Divinópolis, a Comau Smart5 SiX® robot is available, as a teaching and research resource. This represents an opportunity of planning and executing a manipulation task. This paper aimed the complementation of a robotic cell, through the design, construction and programming of a two-finger parallel gripper, compatible with the mentioned manipulator. In addition, the development was oriented in order to make it possible to carry out a cube stacking task described in previous academic work. This was done through a theoretical study to design the parts, followed by 3D modeling, manufacture and assembly processes. Electronic drive circuits were produced, in addition to the control and communication algorithms. It was possible to produce the project detail sheets, and also the lists of components, processes and costs to allow the reproduction of the results obtained. In a in person opportunity, laboratory tests were made to verify the operation of the tool in practice. The implementation of the open loop control functions, for position and gripping force, showed appropriate precision for the application. Thus, it was obtained a versatile tool, of low cost and general purpose, capable of meeting the defined specifications and also assisting in the manipulation task used as a reference. It is understood that the tool resulting from the present paper supports the development of future projects involving robotic manipulation integrated with computer vision and artificial intelligence, taking advantage of the resources of the available open controller.

Keywords: Tool Design, Robotic Manipulation, Comau Smart5 SiX.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>Lista de acrônimos e notações</b> . . . . .	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema . . . . .	2
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3.1 Objetivos Gerais . . . . .	3
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4 Organização do Documento . . . . .	4
<b>2 Revisão da Literatura</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 Revisão Bibliográfica . . . . .	6
2.2 Trabalhos Recentes Relacionados . . . . .	9
<b>3 Fundamentação Teórica</b> . . . . .	<b>11</b>
3.1 Projeto Mecânico . . . . .	11
3.1.1 Análise de Solicitações . . . . .	11
3.1.2 Coeficientes de Segurança . . . . .	15
3.1.3 Conversão de Torque em Translação Linear por um Fuso . . . . .	16
3.1.4 Engrenagens . . . . .	19
3.1.5 Usinagem . . . . .	24
3.1.6 Manufatura Aditiva . . . . .	28

3.1.7	Materiais . . . . .	29
3.1.8	Lubrificação . . . . .	32
3.2	Eletrônica . . . . .	33
3.3	Robótica . . . . .	34
3.3.1	Matriz de transformação homogênea . . . . .	35
3.3.2	Comau Smart5 SiX . . . . .	35
3.4	Softwares . . . . .	37
3.4.1	Software de modelagem 3D . . . . .	37
3.4.2	Visual Studio Code . . . . .	37
3.4.3	ROS . . . . .	38
3.4.4	Arduino . . . . .	38
3.4.5	Protocolo TCP/IP . . . . .	39
3.4.6	WinC5G e PDL2 . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento . . . . .</b>	<b>41</b>
4.1	Materiais e Métodos . . . . .	41
4.2	Projeto da Ferramenta . . . . .	43
4.3	Mecânica . . . . .	44
4.3.1	Listagem das especificações . . . . .	44
4.3.2	Definição dos sistemas estruturais . . . . .	45
4.3.3	Pré-dimensionamento . . . . .	46
4.3.4	Análise das solicitações mecânicas . . . . .	49
4.3.5	Dimensionamento das peças . . . . .	51
4.3.6	Geração de desenhos de projeto e montagem . . . . .	59
4.4	Fabricação e Construção . . . . .	59
4.5	Eletrônica . . . . .	62
4.5.1	Especificação dos componentes eletrônicos . . . . .	62
4.5.2	Montagem dos circuitos . . . . .	63
4.6	Testes e validação do funcionamento . . . . .	66
4.7	Programação . . . . .	70
4.7.1	Desenvolvimento do software de acionamento . . . . .	70
4.8	Listagem de componentes e custos . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões . . . . .</b>	<b>76</b>

5.1	Mecânica . . . . .	76
5.1.1	Projeto e construção da ferramenta . . . . .	76
5.2	Testes e validação em laboratório . . . . .	81
5.3	Eletrônica . . . . .	83
5.3.1	Circuito de controle . . . . .	83
5.3.2	Placa de comunicação . . . . .	84
5.4	Programação . . . . .	85
5.4.1	Testes do controle de força de prensão em malha aberta . . . . .	85
5.4.2	Testes do controle de posição em malha aberta . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>93</b>
6.1	Conclusões . . . . .	93
6.2	Propostas de Continuidade . . . . .	94
<b>A</b>	<b>Folhas de Detalhamento do Projeto . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>B</b>	<b>Listas de Componentes e Custos do Projeto . . . . .</b>	<b>104</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>108</b>

# Lista de Figuras

Figura 3.1 – Força de atrito resultante da interação entre dois corpos em contato (esquerda) e representação ampliada das superfícies (direita). . . . .	12
Figura 3.2 – Momento de um binário. . . . .	13
Figura 3.3 – Cargas combinadas exercendo tensão em uma haste circular maciça. . .	15
Figura 3.4 – Análise mecânica do movimento do fuso. a) Representação com uma rosca quadrada. b) Diagrama de Corpo Livre (DCL) do sistema. c) Ângulo de rosca de um fuso trapezoidal. . . . .	17
Figura 3.5 – Exemplos de pares engrenados comuns. a) Engrenagens cilíndricas de dentes retos. b) Engrenagens cônicas. c) Parafuso sem fim. . . . .	19
Figura 3.6 – Modelo geométrico de engrenagem cilíndrica de dentes retos. . . . .	21
Figura 3.7 – Exemplos de operações de torneamento. . . . .	25
Figura 3.8 – Exemplos de operações de fresamento. . . . .	26
Figura 3.9 – Representação das operações de furação e roscamento. . . . .	28
Figura 3.10–Relação entre resistência específica e densidade para materiais de construção mecânica. . . . .	31
Figura 3.11–Placa de Circuito Impresso (PCI) de interface utilizada em trabalhos anteriores. . . . .	34
Figura 3.12–Robô COMAU Smart5 SiX do CEFET-MG, unidade Divinópolis. . . .	36
Figura 3.13–Detalhamento do flange do robô, utilizado para fixação de ferramentas. .	37
Figura 3.14–Interface principal do software VS Code. . . . .	38
Figura 3.15–Interface principal do software WinC5G. . . . .	40

Figura 4.1 – Diagrama ilustrando o funcionamento completo do projeto. . . . .	42
Figura 4.2 – Modelo 3D da garra Gimatic. a) Vista exterior. b) Vista interior. . . .	43
Figura 4.3 – Diagrama de equilíbrio de forças para uma posição de manipulação vertical. . . . .	46
Figura 4.4 – Diagrama de equilíbrio de forças e momentos para uma posição de manipulação horizontal. a) Vista lateral. b) Diagrama de Corpo Livre (DCL). . . . .	47
Figura 4.5 – Representação da vista frontal da garra. a) Abertura máxima. b) Completamente fechada. . . . .	48
Figura 4.6 – Representação do conjunto bloco suporte para castanha e peças de um dedo. a) Vista lateral. b) Vista frontal. . . . .	49
Figura 4.7 – Comparação entre a força de atrito e a força de preensão necessárias para a manipulação do cubo. . . . .	51
Figura 4.8 – Representação da vista lateral da guia de deslizamento linear. . . . .	55
Figura 4.9 – Relação de transformação entre torque e força de preensão para as condições do projeto. . . . .	56
Figura 4.10–a) Motor especificado. b) Detalhamento das dimensões. . . . .	57
Figura 4.11–Engrenagens e peças dos dedos. . . . .	60
Figura 4.12–Estrutura principal e início da fabricação dos blocos de suporte. . . . .	60
Figura 4.13–Conjunto de transmissão de força e movimento. . . . .	61
Figura 4.14–Etapa final da fabricação. . . . .	62
Figura 4.15–Conclusão do processo de fabricação. . . . .	62
Figura 4.16–Placa central para o controle de acionamento da ferramenta. . . . .	64
Figura 4.17–Circuito completo. . . . .	64
Figura 4.18–Esquemático dos canais de comunicação, nos dois sentidos, do circuito conversor de nível lógico. . . . .	65
Figura 4.19–Teste do acoplamento da ferramenta no flange do manipulador industrial. . . . .	67
Figura 4.20–Algoritmo para o controle das saídas digitais da controladora com base nos botões virtuais do Terminal de Programação, do inglês <i>Teach Pendant</i> (TP). . . . .	67
Figura 4.21–Algoritmo da garra para o reconhecimento de instruções através das entradas digitais. . . . .	68

Figura 4.22–Estruturação da tarefa de manipulação para o teste. . . . .	69
Figura 4.23–Registro manual das configurações do manipulador para a realização do teste. . . . .	69
Figura 4.24–Sequência de instruções do algoritmo de controle em malha aberta de posição. . . . .	71
Figura 4.25–Sequência de instruções do algoritmo de controle em malha aberta da força de preensão. . . . .	73
Figura 4.26–Teste de bancada do algoritmo de controle em malha aberta da força de preensão. . . . .	73
Figura 4.27–Sequência geral de instruções do algoritmo da ferramenta. . . . .	75
Figura 5.1 – Modelo 3D da montagem mecânica do sistema da garra. . . . .	77
Figura 5.2 – Vista frontal da ferramenta, indicando a assimetria da estrutura em relação ao Ponto Central da Ferramenta, do inglês <i>Tool Center Point</i> (TCP). . . . .	77
Figura 5.3 – Resultado da fabricação e construção da parte mecânica. . . . .	78
Figura 5.4 – Comparação da montagem mecânica com o modelo 3D produzido. . . . .	79
Figura 5.5 – Peso da ferramenta completa medido por uma balança digital. . . . .	80
Figura 5.6 – Vistas superior e inferior da montagem da garra. . . . .	80
Figura 5.7 – Resultado final da montagem da garra, com a estrutura aberta. . . . .	81
Figura 5.8 – Teste manual da comunicação entre a controladora e a garra. . . . .	82
Figura 5.9 – Teste da ferramenta por uma tarefa estruturada de empilhamento de dois cubos. . . . .	82
Figura 5.10–Montagem dos componentes do circuito de controle no suporte desenvolvido. . . . .	83
Figura 5.11–Circuito interno de controle posicionado na estrutura da ferramenta. . . . .	84
Figura 5.12–Placa de conversão de nível lógico por fotoacoplador produzida. . . . .	85
Figura 5.13–Experimento de manipulação de um ovo utilizando a ferramenta desenvolvida. . . . .	87
Figura 5.14–Análise do comportamento da força de preensão e da corrente do motor aferidas com base no sinal de entrada aplicado. . . . .	88
Figura A.1 – Tolerâncias dimensionais recomendadas para aplicações mecânicas diversas. . . . .	96

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Coeficientes de atrito estático entre materiais. . . . .	13
Tabela 3.2 – Parâmetros das equações de tensão, para análise de seções transversais maciças circulares e retangulares. . . . .	16
Tabela 3.3 – Coeficientes de atrito para pares enroscados. . . . .	18
Tabela 3.4 – Características geométricas de engrenagens cilíndricas de dentes retos.	20
Tabela 3.5 – Coeficientes para traçado aproximado de perfis a envolvente. . . . .	21
Tabela 3.6 – Fator de forma de Lewis para o ângulo de pressão de $20^\circ$ . . . . .	22
Tabela 3.7 – Densidade $\rho$ , tensão limite de escoamento $\sigma_y$ e módulo de elasticidade $E$ para materiais. . . . .	32
Tabela 3.8 – Características de materiais segundo dados de fabricantes. . . . .	33
Tabela 3.9 – Características e performance do manipulador COMAU Smart5 SiX 6-14. . . . .	36
Tabela 4.1 – Organização das fases de projeto da ferramenta. . . . .	44
Tabela 4.2 – Tensões admissíveis dos materiais para o projeto. . . . .	53
Tabela 4.3 – Especificações técnicas do motor Corrente Contínua (CC). . . . .	57
Tabela 4.4 – Informação representada por cada <i>bit</i> na sequência de uma instrução. .	74
Tabela 5.1 – Resultado dos testes de bancada da placa de conversão de nível lógico isolado por fotoacoplador produzida. . . . .	85
Tabela 5.2 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão, para a corrente do motor. . . . .	86

Tabela 5.3 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão, para a força em si. . . . .	86
Tabela 5.4 – Especificações técnicas da ferramenta desenvolvida. . . . .	89
Tabela 5.5 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, com os dedos partindo da origem. . . . .	90
Tabela 5.6 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, em um movimento relativo com referência crescente. . . . .	91
Tabela 5.7 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, em um movimento relativo com referência decrescente. . . . .	92
Tabela B.1 – Peças mecânicas da ferramenta, materiais e processos de fabricação utilizados, parte 1. . . . .	104
Tabela B.2 – Peças mecânicas da ferramenta, materiais e processos de fabricação utilizados, parte 2. . . . .	105
Tabela B.3 – Custos da montagem da ferramenta, para os circuitos eletrônicos. . . . .	106
Tabela B.4 – Custos da montagem da ferramenta, para as peças mecânicas. . . . .	107

## Lista de acrônimos e notações

<b>ABS</b>	Acrilonitrila-butadieno-estireno
<b>AGMA</b>	<i>American Gear Manufacturers Association</i>
<b>APC</b>	Acopus PC 910
<b>B&amp;R</b>	Bernecker e Rainer
<b>CAD</b>	Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computer-Aided Design</i>
<b>CAM</b>	Manufatura Auxiliada por Computador, do inglês <i>Computer-Aided Manufacturing</i>
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CNC</b>	Controle Numérico Computadorizado
<b>DCL</b>	Diagrama de Corpo Livre
<b>eORL</b>	<i>Enhanced Open Realistic Robot Library</i>
<b>FDM</b>	Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i>
<b>FSM</b>	Máquina de Estados Finitos, do inglês <i>Finite State Machine</i>
<b>GDL</b>	Grau de Liberdade
<b>IDE</b>	Ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
<b>IP</b>	Protocolo da Internet, do inglês <i>Internet Protocol</i>
<b>PCI</b>	Placa de Circuito Impresso

<b>PDL2</b>	<i>Program Development Language</i> , linguagem de programação padrão dos robôs Comau
<b>ROS</b>	<i>Robot Operating System</i>
<b>RPM</b>	Rotações por Minuto
<b>TCC</b>	Trabalho de Conclusão de Curso
<b>TCP</b>	Ponto Central da Ferramenta, do inglês <i>Tool Center Point</i>
<b>TCP</b>	Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês <i>Transmission Control Protocol</i>
<b>TP</b>	Terminal de Programação, do inglês <i>Teach Pendant</i>

## Introdução

A integração de máquinas e dispositivos em processos de manipulação robotizada é uma tendência do desenvolvimento tecnológico para o meio industrial atual. Esses sistemas, com grande capacidade de comunicação entre si, podem se adaptar de forma autônoma a novas e personalizadas tarefas de acordo com as necessidades dos clientes, sustentando um dos pilares da Indústria 4.0 (VAL ROMÁN, 2016). Esses processos produtivos de alta tecnologia vem empregando cada vez mais o conhecimento científico desenvolvido a partir da 3ª Revolução Industrial. Eletrônica, computação e robótica tem sido destaques nesse cenário (ROZO-GARCÍA, 2020).

Na perspectiva da robótica, um mesmo manipulador industrial é capaz de realizar uma ampla gama de trabalhos, tais como soldagem, pintura e montagem, apenas com a mudança de sua ferramenta e sua programação. Essa alta adaptabilidade os torna uma robusta solução de automação (BARRIENTOS, 2007).

No laboratório de robótica do CEFET-MG Campus Divinópolis está disponível, como recurso de ensino e pesquisa, um manipulador Comau Smart5 SiX®. Este consiste em um robô industrial de propósito geral que dispõe de seis graus de liberdade rotacionais e pode ser controlado manualmente através de um Terminal de Programação, do inglês *Teach Pendant* (TP), ou receber algoritmos em *Program Development Language*, linguagem de programação padrão dos robôs Comau (PDL2) (COMAU, 2014).

Tendo isso em vista, foi percebida a possibilidade de planejar e executar uma aplicação empregando a manipulação robotizada. Para isso, é necessário levar em conta um problema comum dos robôs. Em seu funcionamento convencional, eles trabalham isolados do ambiente. Tudo, exceto o que consta em sua configuração, é invisível da sua perspectiva

o que dificulta sua interação com o ambiente de trabalho e seus operadores (HEYER, 2010).

A unidade controladora do manipulador Comau, denominada C5G, possui um recurso promissor para resolver esse problema. Trata-se da plataforma C5G Open®. Esta possibilita a comunicação direta entre a controladora e um computador industrial externo e dedicado, que por sua vez pode trabalhar como uma interface para outros dispositivos externos (FERRARA, 2013). Recentemente, foram buscadas referências e materiais de estudo sobre esse recurso e foi feita a instalação de uma versão atualizada do sistema Open, pelo discente Thalles Campagnani, que se mostrou operacional durante a execução de um programa de teste.

Com isso, precisou-se definir um sistema de sensoramento para fornecer as informações necessárias, relativas ao ambiente. Atualmente, uma das mais poderosas ferramentas de reconhecimento por percepção visual disponíveis é a Visão Computacional (SPONG, 2006). Esta permite a automação de ações que anteriormente apenas humanos eram capazes de fazer. Câmeras podem ser utilizadas para simular a função de um olho na criação de competências baseadas em visão para robôs. Com o auxílio de algoritmos e processamento computacional adequados, melhora-se a capacidade interação com os objetos no espaço de trabalho, através de seu reconhecimento (CORKE, 2011). São aplicações comuns a inspeção, o controle de qualidade e a aferição de posição e orientação de peças (DAVIES, 2005).

A combinação desses sistemas permite a implementação completa de uma tarefa que explora uma boa parcela dos recursos disponíveis no laboratório. Essa tarefa é definida na seção seguinte. Dentre os sistemas citados acima, sendo eles a ferramenta para o robô, o sensoramento por visão computacional e o controle do manipulador pela plataforma C5G Open, a proposta desse trabalho foi adaptada para o desenvolvimento apenas do primeiro, de forma a atender às restrições do isolamento social.

## 1.1 Definição do Problema

Devido às limitações do funcionamento convencional do manipulador industrial Smart5 SiX®, foi observada uma dificuldade para a realização de trabalhos com o mesmo envolvendo sua integração com sensores e dispositivos externos, aplicações que vão além de

uma sequência de movimentos pré-programada.

Uma maneira de resolver esse problema é desenvolver um sistema completo, incluindo o emprego da arquitetura aberta do manipulador, e validar o funcionamento do mesmo através do cumprimento de uma tarefa bem definida.

Nesse sentido, um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), elaborado por Silva (2019), apresentou a simulação de uma tarefa de empilhamento de cubos de faces coloridas, auxiliado por processamento de imagens, corrigindo suas orientações de forma que suas faces coincidam.

Sendo assim, utilizando como referência o trabalho descrito no parágrafo anterior, foi proposto o desenvolvimento de um dos principais recursos necessários para a implementação real da tarefa descrita por Silva (2019). Para isso, foi feito o projeto, a construção e a validação do funcionamento de uma ferramenta do tipo garra com dois dedos paralelos para o manipulador Comau.

## **1.2 Motivação**

O desenvolvimento desse trabalho traz como principal contribuição a expansão das possibilidades de aplicação empregando o manipulador industrial Comau, além de facilitar a sua integração com eventuais novos dispositivos e ferramentas inteligentes que venham a ser desenvolvidos. Isso, naturalmente, possibilitará a realização de novas pesquisas na área.

## **1.3 Objetivos do Trabalho**

São objetivos do trabalho desenvolvido:

### **1.3.1 Objetivos Gerais**

Este trabalho tem como objetivo a complementação de uma célula robotizada para tarefas de manipulação, por meio do desenvolvimento de uma ferramenta do tipo garra para o robô Comau Smart5 Six® e dos algoritmo de acionamento para a mesma. Além disso, com a integração desses sistemas em uma futura implementação completa, a célula

de trabalho deverá ser capaz de realizar o empilhamento de três cubos com faces coloridas, fazendo a correção de suas orientações de forma que haja coincidência de faces.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir uma garra com especificações fundamentadas pelas demandas da tarefa e da interface com a controladora C5G;
- Desenvolver uma placa de conversão de nível lógico para permitir a comunicação entre a controladora do robô e o circuito eletrônico da ferramenta;
- Elaborar um algoritmo para o acionamento da garra, que controle em malha aberta o posicionamento e a força de prensão;
- Validar em laboratório o funcionamento da ferramenta, realizando o empilhamento de cubos de forma autônoma e estruturada;
- Estruturar a comunicação entre os sistemas da ferramenta e da controladora com base na disponibilidade de entradas e saídas digitais desta.

## 1.4 Organização do Documento

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No presente capítulo foram introduzidos os principais temas abordados durante o estudo. Em seguida, foi definido o problema a ser tratado, seguido da motivação que justifica sua escolha. Por fim, foram listados os objetivos da investigação.

No segundo capítulo são apresentados os fundamentos sobre os quais o trabalho é baseado. É feito um breve relato do desenvolvimento das arquiteturas robóticas em direção à sua integração inteligente com o ambiente. Posteriormente, são descritos resultados recentes obtidos por pesquisas relacionadas.

No terceiro capítulo são definidos os conceitos e ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

O quarto capítulo apresenta o planejamento, as etapas metodológicas e os recursos necessários para a realização da proposta. São apresentados diagramas para visão geral e organização das estratégias. Também é feita uma lista com os custos do projeto.

No quinto capítulo são detalhados os resultados dos procedimentos adotados neste documento, através de recursos gráficos, cálculos e análises. É feita uma avaliação de cada vertente do trabalho, começando pelo projeto mecânico da ferramenta e prosseguindo com os algoritmos de controle de acionamento da mesma.

Por fim, no sexto capítulo, são feitas conclusões sobre o desenvolvimento executado e são apresentadas as perspectivas futuras e propostas de continuidade.

## Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentadas as principais estratégias presentes na literatura para a integração de máquinas e dispositivos em processos de manipulação robotizada. Em seguida, são abordados estudos recentes de técnicas atualmente empregadas nessa área.

### 2.1 Revisão Bibliográfica

A interação entre manipuladores e dispositivos é empregada em diversas aplicações principalmente no âmbito industrial. Nesse sentido, células de trabalho robotizadas são arquiteturas clássicas de organização e disposição eficiente dos equipamentos (MELCHIORRI, 1994), que são utilizadas ainda atualmente nos meios produtivos automatizados. Porém, observa-se que na maioria dos processos são utilizados sistemas fechados de controle e atuação, desenvolvidos especificamente para a tarefa designada e com base em requisitos estritos (OONISHI, 1999). Para permitir a interação dos manipuladores com o ambiente enquanto realizam suas tarefas de forma rápida e precisa é necessário um sistema de controle aberto capaz de se comunicar com uma rede de sensores, dispositivos e plataformas computacionais (BLOMDELL et al., 2005).

Ao longo do tempo foram publicados por diferentes fabricantes e laboratórios de pesquisa o progresso no desenvolvimento de arquiteturas abertas (OLIVEIRA et al., 2007). Inicialmente, foram empregados sistemas baseados na interface com um computador pessoal. A falta de informações do hardware levou a uma abordagem direcionada ao software, pela criação de bibliotecas de controle baseadas em conjuntos de instruções. Posteriormente, foram utilizados processadores de sinais digitais, operando em conjunto com um

sistema operacional em tempo real para um nível de acesso mais amplo. Essa estratégia se mostrou funcional apenas em robôs simples, com baixa quantidade de juntas, devido à velocidade limitada da interface de comunicação. Após isso, foram alcançados novos graus de abertura utilizando métodos de *retrofitting*, com aplicações limitadas também pela capacidade dos barramentos. As técnicas mais recentes envolvem a manipulação de camadas da controladora através de interfaces de comunicação de alto desempenho.

Dando sequência a esse desenvolvimento, uma iniciativa da Comau, estudada por Ferrara (2013), apresentou o sistema de controle aberto C5G Open. Trata-se de uma versão melhorada do anterior C4G Open, que é dedicado a usuários especializados. Seu modo de operação é configurado pela interface TP na linguagem PDL2. Um computador industrial dedicado Acopus PC 910 (APC) da Bernecker e Rainer (B&R) é configurado para interagir em tempo real com a controladora do robô através do protocolo de comunicação *Ethernet Powerlink* (FERRARA, 2013). A programação no APC é feita utilizando a biblioteca *Enhanced Open Realistic Robot Library* (eORL). Com essa plataforma, é possível realizar simulações realistas com segurança, sem a energização dos motores, e também controlar variáveis como posição e velocidade das juntas a partir do APC (FERRARA, 2013). Mesmo assim, a linguagem operacional do sistema é de relativo baixo nível, e ele não permite a integração de sensores diretamente.

Como uma solução para essa demanda, uma arquitetura apresentada por Romanelli et al. (2010) permite o acesso às malhas de controle do robô através de uma plataforma computacional externa. Isso é feito através da adição de novas camadas sobre a estrutura base da plataforma C5G Open. O sistema passa a ser dividido entre dois módulos, que se comunicam através de uma rede local por um protocolo TCP/IP. O primeiro é utilizado para a programação de alto nível do robô, baseada nos sensores conectados ao computador externo, e o segundo para o controle dos atuadores baseado em receber, interpretar e executar tarefas por meio do APC.

Uma aplicação desenvolvida por Michieletto et al. (2014) implementa o método discutido no parágrafo anterior utilizando a *framework Robot Operating System* (ROS). Trata-se de uma estrutura de funcionalidade genérica que fornece bibliotecas e ferramentas para auxiliar desenvolvedores em aplicações de robótica (ROS, 2020). Sua versão industrial ROS-I possui capacidades expandidas voltadas para processos produtivos, simplificando a programação da célula robotizada e a integração de módulos e sensores externos. Sua

estrutura em software pode ser reutilizada em sistemas semelhantes ou versões diferentes do mesmo para o qual foi desenvolvida, apenas pela substituição das bibliotecas nativas. Com isso, foi elaborada uma interface robusta entre os dispositivos externos e o sistema do manipulador. Esta mantém o acesso direto aos comandos nativos, para permitir a integração de ferramentas não compatíveis com o ROS, por meio de uma conexão TCP/IP, que garante confiabilidade no envio e recebimento de dados. Além disso, empregando o simulador 3D Gazebo foram realizados testes de movimentação do robô nos ambientes real e de simulação. Estes comprovaram quantitativamente que foi obtida uma precisão equivalente, para o mesmo algoritmo em ambos os ambientes.

Com base nesta estrutura, foi desenvolvido por Bisson (2014) um sistema de teleoperação baseado em visão computacional para um robô Comau controlado pela plataforma C5G Open. Foi utilizado para esse fim um sensor Microsoft Kinect devido à viabilidade de custo e disponibilidade de bibliotecas compatíveis. Foi adotado o método sem marcação para a identificação das juntas do esqueleto humano, sendo este descrito por *frames* de transformação estimados via software. A *framework* ROS e o sistema do sensor foram instalados em um computador externo e a comunicação ao APC dos dados processados é feita através de um protocolo TCP/IP. O algoritmo principal realiza a função de rastreamento e remapeamento das juntas do esqueleto para as juntas do manipulador.

Foram implementadas duas estratégias a nível de simulação no ambiente Gazebo. A primeira consistiu em remapear diretamente os movimentos do ombro, braço e pulso esquerdos do operador em referências para as juntas do robô. A última baseia-se no cálculo da cinemática inversa do manipulador a partir da posição cartesiana da mão do operador. Em ambos os casos foram necessárias mudanças no sistema de coordenadas e ajustes de escala, além de filtrar as instabilidades naturais do movimento humano. Comparando os resultados, foi observado que a primeira estratégia possibilita o controle individual das juntas do robô de forma livre e intuitiva, características úteis em um ambiente industrial, mas não possui precisão no posicionamento do *frame* da ferramenta. O segundo caso é limitado, por controlar apenas a posição do *frame* final (BISSON, 2014).

## 2.2 Trabalhos Recentes Relacionados

Nesta seção são abordados estudos recentes envolvendo a integração de um manipulador, uma ferramenta inteligente e/ou um sistema de controle e sensoriamento complexo.

Uma estratégia voltada para a área de processos de fabricação automatizados foi implementada no trabalho de Camargos (2016). Neste, foi feito o projeto de uma ferramenta de corte e gravação a laser para um manipulador Comau. A base do processo consiste no fornecimento de referências para o atuador a partir de uma imagem vetorizada. Para isso, foi desenvolvido um software capaz de traduzir um arquivo que representa uma imagem através de código-G para uma sequência de instruções em PDL2. Assim, pôde ser executada pelo robô uma tarefa complexa processada externamente. A vantagem do uso de um manipulador industrial é que este permite aplicações flexíveis, como a gravação em superfícies tridimensionais.

Em outra perspectiva, o estudo realizado por Dionísio et al. (2018) abrange um avanço para a automatização do processo de braquiterapia, uma modalidade de radioterapia interna para tratamento de câncer. No caso desse trabalho, é direcionado ao câncer de próstata. Esta, na forma convencional, é executada manualmente por um clínico e consiste no posicionamento de sementes radioativas no tecido tumoral por meio de uma agulha com êmbolo. Ao utilizar um manipulador robótico para essa função, é garantida a precisão necessária, além de afastar fisicamente o clínico do material radioativo. Para isso, foram feitas simulações em uma etapa de planejamento do tratamento pelo grupo NRI (Núcleo de Radiações Ionizantes) do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG. Em seguida, foi desenvolvido um protótipo de ferramenta para testar o agulhamento em gelatina balística, simulando o tecido humano. Foram obtidos resultados satisfatórios, porém com algumas limitações.

Para solucionar os problemas observados, foi projetada em Vaz (2019) uma ferramenta adequada e de baixo custo. Os materiais foram escolhidos para possibilitar a esterilização térmica e química da mesma. Além disso, foi obtida uma estrutura de dimensões reduzidas e com uma agulha de maior comprimento, aumentando a capacidade de armazenamento de sementes e reduzindo a necessidade de recarga. Foi projetado também um circuito eletrônico para comunicação entre o sistema de acionamento da ferramenta e a controladora do robô.

O trabalho de Osorio-Comparan et al. (2019) apresentou o projeto de um sistema baseado em visão computacional para identificação de posição e orientação de objetos para manipulação, utilizando um robô industrial Kuka KR 5. Um sensor Microsoft Kinect em conjunto com a biblioteca OpenCV e um algoritmo de análise de componentes principais (PCA) foram responsáveis pelo processamento de imagens. A integração dos componentes foi feita através de uma arquitetura centrada em ROS.

Ao combinar as capacidades de mobilidade e manipulação dos robôs móveis e manipuladores industriais, Luo et al. (2020) mostra o desenvolvimento um sistema modular integrando as funções de ambos para atender às demandas de um cenário de coleta e entrega de produtos. Para esse fim, foi utilizado como sensor uma câmera RGB-D, sendo D um canal da imagem que relaciona cada pixel com a distância entre o plano da mesma e o objeto. Com isso, foram elaborados algoritmos para localização e mapeamento, prevenção de colisão, detecção e transporte de objetos. Estes foram integrados em uma arquitetura baseada em tarefas, construída a partir da estrutura ROS. Além disso foi aplicado o conceito de Máquina de Estados Finitos, do inglês *Finite State Machine* (FSM), para gerenciar e monitorar o estado de cada módulo. Por fim, desenvolveram um robô móvel autônomo com tração diferencial combinado a um manipulador industrial com uma garra. Testes realizados provaram a eficácia e estabilidade do sistema.

Uma metodologia avançada de manipulação de objetos tempo em real foi pesquisada por Chu (2020). Seu objetivo foi obter melhorias no processo, por meio da compreensão das características e funcionalidades dos objetos com base em visão computacional. Nesse contexto, foram empregadas técnicas de aprendizado de máquina para desenvolver um método geral para agarrar novos objetos, pois os conjuntos de dados existentes incluem uma quantidade limitada destes. Foi explorada a identificação de maneiras viáveis de agarrar objetos em cenários reais através de uma arquitetura construída com métodos de predição, separação em categorias e classificação por prioridade para cada parte de múltiplos objetos. Foram realizados experimentos com um manipulador e um sensor RGB-D para avaliar quantitativamente os resultados, que revelaram melhorias no planejamento de trajetória e de performance geral.

Os trabalhos citados apresentam relação direta com o desenvolvimento deste TCC, sendo que os primeiros exemplificam o desenvolvimento de ferramentas inteligentes para robôs e, os últimos, estratégias relacionadas à tarefa de manipulação.

## Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta uma descrição dos principais recursos teóricos e ferramentas empregadas no desenvolvimento deste TCC e visa servir de referencial para os elementos técnicos e conceituais. Estes foram organizados entre os seguintes tópicos:

- Projeto Mecânico
- Eletrônica
- Robótica
- *Softwares*

### 3.1 Projeto Mecânico

Esta seção apresenta o conjunto de teorias empregadas no desenvolvimento da parte mecânica do trabalho.

#### 3.1.1 Análise de Solicitações

##### Força de Atrito

De acordo com Halliday (2012) e Young (2008), a força de atrito consiste no efeito da aderência entre dois corpos em contato. Ao serem aplicadas forças com a intenção de deslizar uma superfície em relação a outra, uma força contrária à resultante das mesmas surge como reação a esse movimento. Isso ocorre devido à rugosidade presente nas superfícies. A Figura 3.1 ilustra esse efeito.

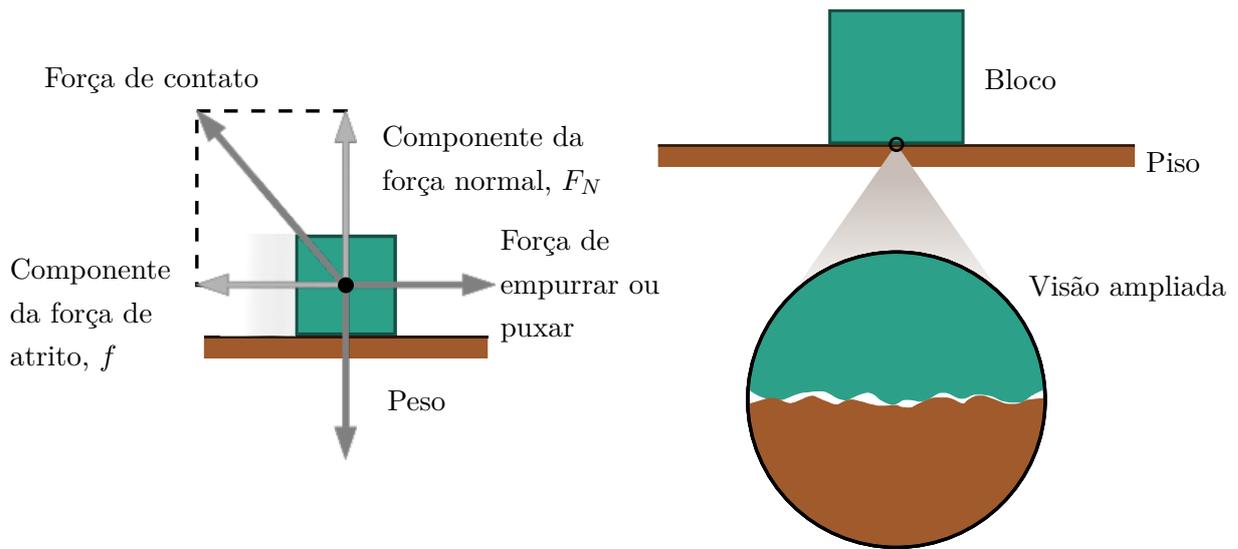


Figura 3.1 – Força de atrito resultante da interação entre dois corpos em contato (esquerda) e representação ampliada das superfícies (direita).

Fonte: Adaptado de Young (2008).

Se o corpo não se move, a resultante das forças aplicadas no plano de deslizamento e uma força de atrito estático se equilibram, com módulos iguais e sentidos opostos (HALLIDAY, 2012). O valor máximo dessa segunda força pode ser quantificado conforme a Equação 3.1:

$$f_{s,max} = \mu_s F_N \quad (3.1)$$

A força normal  $F_N$  é a reação que a superfície exerce sobre o corpo, conforme a 3ª Lei de Newton, proporcional à pressão exercida pelo corpo em relação à superfície. O coeficiente de atrito estático  $\mu_s$  é medido experimentalmente e varia conforme os materiais em contato e a lubrificação. No entanto, se houver deslizamento, o módulo da força  $f$  é reduzido e passa-se a utilizar o coeficiente de atrito cinético  $\mu_k$  (HALLIDAY, 2012).

A Tabela 3.1 mostra coeficientes obtidos experimentalmente para a interface entre materiais comuns.

Tabela 3.1 – Coeficientes de atrito estático entre materiais.

Material 1	Material 2	Coeficiente de Atrito ( $\mu_s$ )	
		Superfície limpa	Superfície lubrificada
Aço	Aço	0,74	0,16
Alumínio	Alumínio	1,35	0,3
Cobre	Cobre	1	0,08
Nylon	Nylon	0,15 – 0,25	-
Borracha	Sólidos	1 – 4	-
Madeira	Metais	0,2 – 0,6	-

Fonte: Adaptado de CarbideDepot (2020).

### Momento de um Binário

Segundo Beer (2012), duas forças com linhas de ação paralelas, sentidos opostos e mesma intensidade compõem um binário (Figura 3.2). Quando isso ocorre, o equilíbrio de forças é mantido, mas o equilíbrio de momentos não, e o sistema tende a rotacionar sem que ocorra translação. O módulo desse momento pode ser descrito de acordo com a Equação 3.2:

$$M = Fd \quad (3.2)$$

Sendo  $F$  a intensidade de uma das forças e  $d$  a distância perpendicular entre suas linhas de ação.

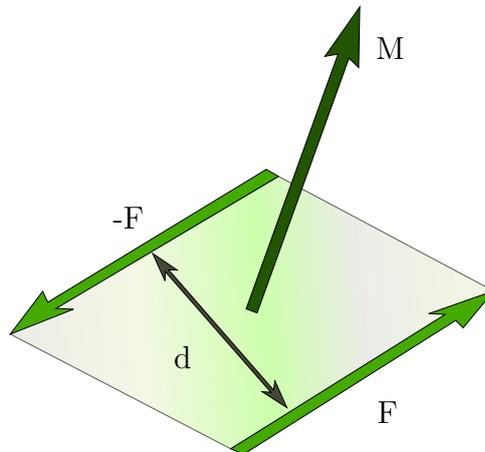


Figura 3.2 – Momento de um binário.

Fonte: Adaptado de Beer (2012).

## Diagrama de Corpo Livre

Um Diagrama de Corpo Livre (DCL) é uma representação simplificada do sistema a ser analisado, que considera todas as forças atuantes sobre o mesmo (BEER, 2012).

## Equilíbrio Estático

As forças exercidas sobre um corpo rígido podem ser representadas por um conjunto força-binário em um ponto arbitrário  $O$ . Quando a resultante de todas as forças e de todos os momentos que atuam sobre esse ponto é igual a zero, temos que o corpo rígido está em equilíbrio (BEER, 2012).

Conforme visto em Hibbeler (2010) e Beer (2012), as condições necessárias e suficientes para a obtenção do equilíbrio estático podem ser verificadas pelas relações vetoriais 3.3 e 3.4 a seguir.

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

$$\sum \mathbf{M}_O = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

Com  $\mathbf{r}$  sendo um vetor de distância em relação a  $O$ , perpendicular a um vetor de força  $\mathbf{F}$ .

## Esforços mecânicos

Antes de dar forma, dimensionar e definir os materiais para as peças de um sistema mecânico é necessário prever, calcular e evitar as condições de deformação permanente ou ruptura para cada elemento das mesmas. Isso requer uma análise dos esforços envolvidos no processo (NORTON, 2013).

Segundo Nash (1982), os quatro principais tipos de tensão exercidas sobre uma peça são a Normal, a Cisalhante, a de Torção e a de Flexão. A superposição destas em um ponto arbitrário permite a quantificação das solicitações presentes no mesmo.

O procedimento de análise proposto por Hibbeler (2010) consiste em encontrar as cargas internas em uma seção transversal analisada, pela aplicação do Método das Seções, após a construção de um DCL. Isso é feito pela realização de um corte virtual na peça para verificar a distribuição das forças e momentos atuantes naquela seção. Essa avaliação considera materiais homogêneos com comportamento linear elástico.

Para a realização dos cálculos, as equações de 3.5 a 3.10 relacionam as forças atuantes em uma peça e as características geométricas da mesma com as tensões máximas exercidas em uma seção analisada (NORTON, 2013).

Tensão normal pura:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \quad (3.5)$$

Cisalhamento puro:

$$\tau_C = \frac{V}{A} \quad (3.6)$$

Cisalhamento devido à flexão:

$$\tau_F = \frac{VQ}{It} \quad (3.7)$$

Torção em seção circular:

$$\tau_T = \frac{Tc}{J} \quad (3.8)$$

Torção em seção não circular:

$$\tau_T = \frac{T}{Q_t} \quad (3.9)$$

Flexão:

$$\sigma_F = \frac{Mc}{I} \quad (3.10)$$

A Figura 3.3 mostra o exemplo de uma barra com seção transversal circular sujeita à todas as cargas citadas. A Tabela 3.2 organiza a descrição dos parâmetros utilizados para os cálculos em dois casos diferentes.

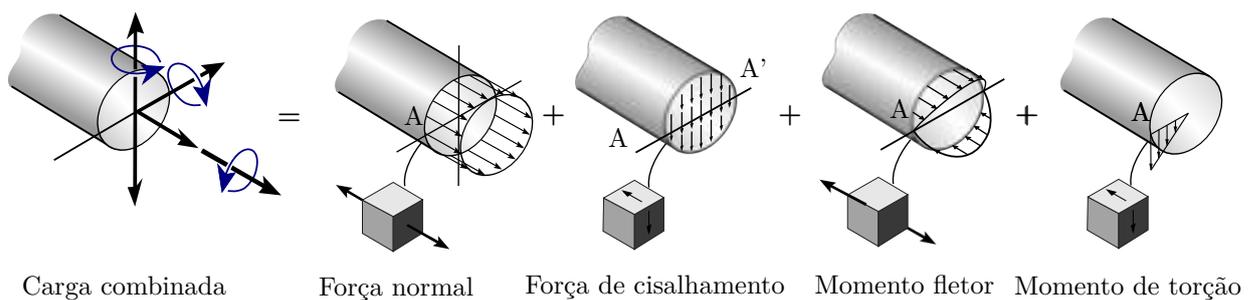


Figura 3.3 – Cargas combinadas exercendo tensão em uma haste circular maciça.

Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

### 3.1.2 Coeficientes de Segurança

Segundo Norton (2013) e Callister (2008), o fator de segurança consiste em um valor adimensional, que indica o quanto os esforços admissíveis definidos para uma peça são

Tabela 3.2 – Parâmetros das equações de tensão, para análise de seções transversais maciças circulares e retangulares.

Parâmetro	Descrição	Seção circular (raio $r$ )	Seção retangular (base $b$ , altura $h$ )
$N$	Força normal	-	-
$A$	Área da seção	$\pi r^2$	$bh$
$V$	Força cortante	-	-
$Q$	Momento estático	$\bar{y}'\bar{A}'$	$\bar{y}'\bar{A}'$
$\bar{y}'$	Distância da linha neutra ao centroide de $\bar{A}'$	$4r/3\pi$	$h/4$
$\bar{A}'$	Área da seção dividida por $t$	$\pi r^2/2$	$bh/2$
$I$	Momento de inércia da seção transversal	$\pi r^4/4$	$bh^3/12$
$t$	Largura da área da seção transversal no ponto analisado	$2r$	$b$
$T$	Torque	-	-
$c$	Distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado	$r$	$h/2$
$J$	Momento de inércia polar	$\pi c^4/2$	-
$Q_t$	Função da geometria da seção	-	$b^2h^2/(3b + 1, 8h)$
$M$	Momento Fletor	-	-

Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010) e Norton (2013).

inferiores aos limites suportados pelo material. Sua função principal é considerar as incertezas de projeto, como o nível de precisão dos modelos analíticos utilizados e a variabilidade nas propriedades dos materiais, sendo desejável um valor superior a 1.

Quando não existem normas para regulamentação, a escolha do coeficiente de segurança se resume a uma decisão de projeto, de acordo com a disponibilidade de dados representativos. Maiores valores proporcionam ao mesmo tempo o aumento da confiabilidade e dos custos, logo deve ser feita uma escolha apropriada para evitar o superdimensionamento. São propostos valores entre 1,3 e 3 para materiais dúcteis e o dobro para materiais frágeis (NORTON, 2013).

### 3.1.3 Conversão de Torque em Translação Linear por um Fuso

Os fusos ou parafusos de potência podem ser utilizados em conjunto com buchas roscadas (castanhas) para transformar o torque aplicado no eixo de rotação em movimento

retilíneo. Os autores Shigley (2005), Norton (2013) e Galdino (2014) apresentam métodos para calcular as características desse tipo de interação. Esses cálculos serão abordados a seguir.

De acordo com Galdino (2014), considerando a utilização de um motor como fonte de torque, sua frequência em Rotações por Minuto (RPM) necessária para mover um objeto através de um parafuso de potência uma distância  $\Delta S$  em  $\Delta t$  segundos, com base no avanço da rosca  $A$ , é calculada pela Equação 3.11.

$$n = \frac{\Delta S}{A} \frac{60}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Além disso, a relação do torque necessário no eixo para elevar uma carga verticalmente foi determinada por Shigley (2005) e Norton (2013) a partir dos passos ilustrados na Figura 3.4.

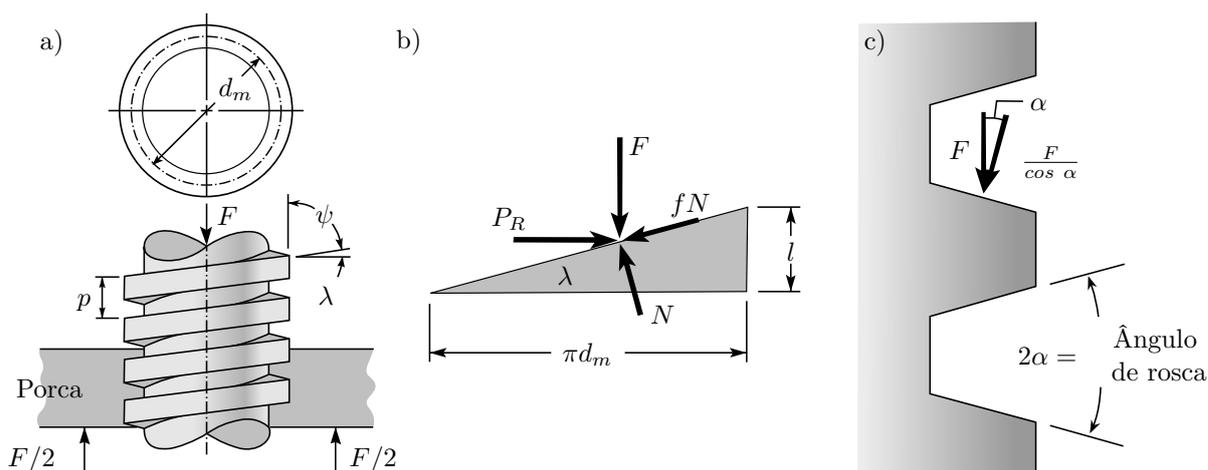


Figura 3.4 – Análise mecânica do movimento do fuso. a) Representação com uma rosca quadrada. b) DCL do sistema. c) Ângulo de rosca de um fuso trapezoidal.

Fonte: Adaptado de Shigley (2005).

A análise partiu de um sistema utilizando um parafuso de potência com a rosca quadrada (Figura 3.4a). Através do diagrama da Figura 3.4b, são empregadas as equações de equilíbrio estático para encontrar a força lateral  $P_R$  exercida na castanha pela rosca. Essa força é multiplicada pelo raio médio  $d_m/2$  para a obtenção do torque (NORTON, 2013).

Como mostra a Figura 3.4c, para aplicações com roscas trapezoidais é necessário um ajuste na formulação, considerando o ângulo de rosca  $2\alpha$ . A rosca trapezoidal é mais fácil de fabricar e transmite movimento de forma suave e uniforme. Porém, a presença do

ângulo  $\alpha$  aumenta a força de atrito na rosca, elevando a demanda de torque (SHIGLEY, 2005).

Sendo feitas essas considerações, foi obtida a Equação 3.12. Esta, descrita na notação de Galdino (2014), utiliza  $A$  como o avanço ( $l$ ),  $R$  como a força de resistência ao movimento ( $F$ ) e  $\mu$  como o coeficiente de atrito da rosca ( $f$ ).

$$M_{T,v} = \left[ ma + \frac{(ma + R)(\mu\pi d_m \sec \alpha + A)}{\pi d_m - \mu A \sec \alpha} \right] \frac{d_m}{2} \quad (3.12)$$

Através de um procedimento similar, foi obtida a Equação do torque necessário para o movimento de uma carga na horizontal (GALDINO, 2014):

$$M_{T,h} = \left[ ma + \frac{m(a + \mu_c g)(\mu\pi d_m \sec \alpha + A)}{\pi d_m - \mu A \sec \alpha} \right] \frac{d_m}{2} \quad (3.13)$$

Em que  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\mu_c$  o coeficiente de atrito entre as superfícies em contato com a base. Em ambos os casos,  $m$  representa a massa do conjunto suporte-carga e  $a$  é a aceleração imposta sob o mesmo.

Outra característica da conversão de movimento por fuso é o autobloqueio. O efeito do peso da carga pode ocasionar movimento no parafuso no sentido indesejado, sem a presença de esforços externos. Segundo Norton (2013), para que isso não ocorra, é necessário que a relação 3.14 seja atendida, com  $\lambda$  sendo o ângulo de avanço.

$$\mu \geq \tan \lambda \cos \alpha \quad (3.14)$$

A Tabela 3.3 fornece uma referência para valores de coeficiente de fricção de escorregamento entre diferentes combinações de materiais para fusos e castanhas.

Tabela 3.3 – Coeficientes de atrito para pares enroscados.

Material do parafuso	Material da porca			
	Aço	Bronze	Latão	Ferro Fundido
Aço, seco	0,15-0,25	0,15-0,23	0,15-0,19	0,15-0,25
Aço, óleo de máquina	0,11-0,17	0,10-0,16	0,10-0,15	0,11-0,17
Bronze	0,08-0,12	0,04-0,06	-	0,06-0,09

Fonte: Shigley (2005).

### 3.1.4 Engrenagens

Engrenagens são elementos de máquinas utilizados para transmitir torque e velocidade angular em diversas aplicações. Suas estruturas são altamente padronizadas por normas da *American Gear Manufacturers Association* (AGMA), para projeto e dimensionamento, escolha de materiais, processo de fabricação e montagem (NORTON, 2013).

Existem vários tipos de transmissões engrenadas, sendo com eixos paralelos, concorrentes ou que se interceptam. Como consequência, os modelos variam de simples engrenagens cilíndricas de dentes retos à complexas como as cônicas de dentes helicoidais (FILHO, 1977).

Segundo Niemann (2018), a transmissão por engrenagens é robusta, pois conjuntos de dimensões reduzidas são capazes de suportar cargas elevadas com alto rendimento e durabilidade. Existem também desvantagens como o custo de fabricação e o ruído produzido durante o funcionamento, mas ambas variam de acordo com o modelo adotado. Nesse sentido, são utilizados dentes helicoidais para a redução do ruído, em detrimento do aumento do custo.

Entre os modelos comuns, mostrados na Figura 3.5, as engrenagens cônicas permitem aplicações com eixos não paralelos, mas possuem um limite viável baixo para a relação de transmissão, além do custo elevado. A transmissão por parafuso sem fim é silenciosa, possui menor custo de fabricação e apresenta altas relações de transmissão. Porém, sua eficiência diminui com o aumento destas (NIEMANN, 2018).

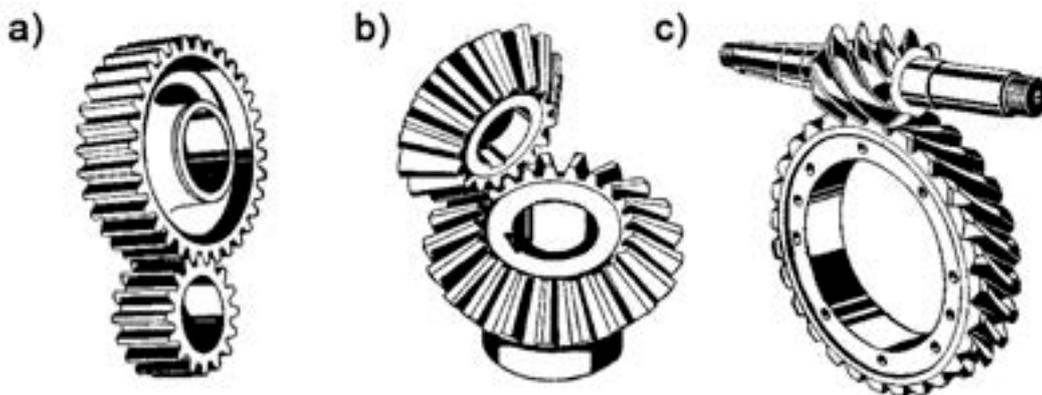


Figura 3.5 – Exemplos de pares engrenados comuns. a) Engrenagens cilíndricas de dentes retos. b) Engrenagens cônicas. c) Parafuso sem fim.

Fonte: Adaptado de Niemann (2018).

Segundo Norton (2013), em um par engrenagens, o pinhão é aquela que recebe a potência do motor e a transmite para a coroa, que é movida em relação à primeira conforme a razão de engrenamento. Esta é descrita em função do número de dentes  $Z$ , da velocidade angular  $\omega$ , ou do torque  $T$  das mesmas, conforme a Equação 3.15.

$$m_G = \frac{Z_c}{Z_p} = \frac{\omega_p}{\omega_c} = \frac{T_c}{T_p} \quad (3.15)$$

### Características Geométricas

A Tabela 3.4 apresenta relações determinadas por Shigley (2005), Filho (1977) e Provenza (1991) para a definição da geometria de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos com ângulo de pressão ( $\phi$ ) de  $20^\circ$ .

Tabela 3.4 – Características geométricas de engrenagens cilíndricas de dentes retos.

Parâmetro	Descrição	Equação
$m$	Módulo métrico	-
$Z$	Número de dentes	-
$d_p$	Diâmetro primitivo	$d_p = mZ$
$D$	Distância entre centros	$D = d_{p,1}/2 + d_{p,2}/2$
$d_e$	Diâmetro externo	$d_e = d_p + 2m$
$p$	Passo circular	$p = \pi m$
$P$	Passo diametral	$P = \pi/p$
$s$	Espessura circular	$s = p/2$
$d_i$	Diâmetro interno	$d_i = m(Z - 2.334)$
$\phi$	Ângulo de pressão	$20^\circ$
$d_b$	Diâmetro de base	$d_b = d_p \cos \phi$
$l$	Comprimento do dente	$l = \gamma m$
$\gamma$	Multiplicador	Valor entre 6 e 20
$r_1$	Raio maior do dente	$r_1 = f_1 m$
$r_2$	Raio menor do dente	$r_2 = f_2 m$
$f_1$	Coefficiente para traçado aproximado do perfil a envolvente do dente	Tabela 3.5
$f_2$	Coefficiente para traçado aproximado do perfil a envolvente do dente	Tabela 3.5

A Tabela 3.5 mostra alguns valores para os coeficientes  $f_1$  e  $f_2$  em função do número de dentes  $Z$  da engrenagem. A Figura 3.6 mostra o modelo geométrico obtido pelo cálculo dos parâmetros apresentados.

Tabela 3.5 – Coeficientes para traçado aproximado de perfis a envolvente.

Nº de dentes $Z$	Coeficientes	
	$f_1$	$f_2$
16	2,92	1,46
20	3,22	1,89
24	3,64	2,24
28	3,92	2,59
32	4,20	2,93

Fonte: Adaptado de Provenza (1991).

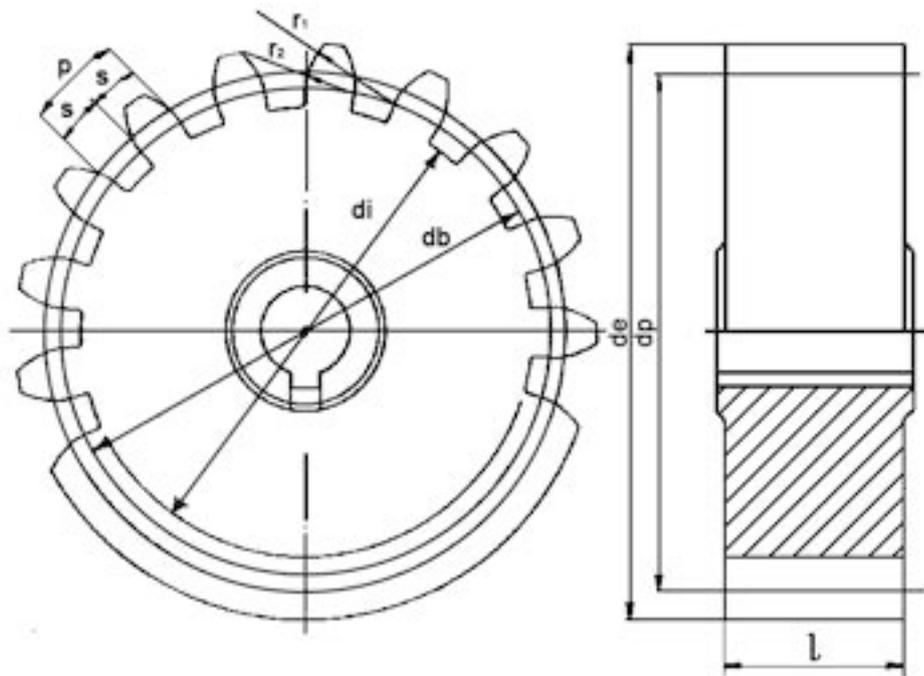


Figura 3.6 – Modelo geométrico de engrenagem cilíndrica de dentes retos.

Fonte: Adaptado de Provenza (1991).

### Torque transmitido

De acordo com Norton (2013), durante a transmissão do movimento, cargas com componentes radiais e tangenciais atuam devido ao ângulo de pressão. As primeiras não transmitem potência. Assim, temos que o torque é transmitido conforme a Equação 3.16:

$$T = \frac{d_p}{2} W_t \quad (3.16)$$

Nela, a carga tangencial transmitida  $W_t$  é a força que atua no ponto de contato do par engrenado, no círculo primitivo.

### Equação de flexão de Lewis

A partir da definição das características geométricas, é feita uma análise para o projeto da engrenagem, de forma verificar sua resistência à falhas, seja por flexão dos dentes ou por desgaste superficial. O primeiro caso ocorre quando a tensão aplicada no dente excede o limite de escoamento ou de fadiga por flexão do material. Já o segundo ocorre quando a tensão de contato excede o limite de fadiga superficial (SHIGLEY, 2005).

Segundo Norton (2013) e Shigley (2005), a análise da flexão pelo método de Lewis considera o dente da engrenagem como uma viga e utiliza a Equação 3.10 da seção de esforços mecânicos como base para a obtenção da expressão 3.17:

$$\sigma = \frac{W_t}{lmY} \quad (3.17)$$

Trata-se da forma métrica da equação. Assim, utilizando as unidades de dimensões em milímetros e forças em newtons o resultado será uma tensão em megapascal. Esse cálculo é uma aproximação que considera apenas a carga tangencial e despreza o efeito das cargas radiais. Além disso, considera-se que a carga total é concentrada em apenas um dente e que a força tangencial máxima é exercida na ponta do mesmo (SHIGLEY, 2005). Alguns valores para o fator de forma de Lewis  $Y$ , em função do número de dentes da engrenagem, podem ser observados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Fator de forma de Lewis para o ângulo de pressão de 20°.

Nº de dentes	$Y$
16	0,296
20	0,322
24	0,337
28	0,353
34	0,371

Fonte: Adaptado de Shigley (2005).

### Fator de correção de velocidade

Inclui-se um fator proporcional de velocidade  $K_v$ , definido pela Equação 3.18, à equação de Lewis para considerar o efeito do aumento da carga causado pela velocidade de operação. Este provoca falhas na engrenagem ao serem aplicadas tensões inferiores ao limite calculado pela relação estática (NORTON, 2013).

$$K_v = \frac{6,1 + V}{6,1} = \frac{6,1 + \omega d_p/2}{6,1} \quad (3.18)$$

Temos que  $V$  é a velocidade linear em metros por segundo no círculo primitivo e  $\omega$  é a velocidade angular da engrenagem em radianos por segundo. O coeficiente descrito por essa relação é válido para engrenagens fabricadas por processos de corte e usinagem Shigley (2005).

### Tensão admissível

Foi visto em Norton (2013) e Shigley (2005) que métodos de projeto mais detalhados são propostos pela AGMA para situações de exigência elevada. Existem outros fatores de correção que consideram, além da velocidade de operação, o ambiente de trabalho, a ocorrência de sobrecargas e choques e a distribuição de cargas. Outros elementos como a aplicação repetitiva de tensões elevadas no contato, lubrificação inadequada e abrasão influenciam também na durabilidade superficial.

Da mesma maneira, são propostos coeficientes de correção para o cálculo das tensões admissíveis de flexão, como mostra a Equação 3.19. São considerados fatores como temperatura  $Y_\theta$ , confiabilidade  $Y_Z$  e regime de trabalho  $Y_N$ . Porém, esses coeficientes modificam o valor final apenas em condições de ciclos de carga específicos, temperaturas superiores a  $120^\circ C$  e confiabilidade superior a 99% (SHIGLEY, 2005).

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{FP}}{S_F} \frac{Y_N}{Y_\theta Y_Z} \quad (3.19)$$

Com isso, a expressão se resume à tensão admissível de flexão  $\sigma_{FP}$ , de acordo com o material empregado na fabricação e um fator de segurança  $S_F$ .

### 3.1.5 Usinagem

A usinagem é um processo de fabricação que consiste na remoção de material a partir de uma peça bruta, produzindo o denominado cavaco, utilizando uma ferramenta de corte. Esse processo permite a produção em série de produtos a um custo reduzido, em comparação a outras tecnologias. Além disso, é possível obter praticamente qualquer forma, com dimensões, detalhes e acabamento superficial precisos (CHIAVERINI, 1986a).

Sua execução consiste em uma série de movimentos, que podem ser passivos e ativos. Segundo Ferraresi (2003) e Machado et al. (2015), os primeiros determinam o posicionamento da ferramenta, realizando a aproximação da mesma em relação à peça e definindo a profundidade de usinagem. Os últimos são responsáveis pelo corte (cisalhamento) efetivo do material através de uma combinação de movimentos de corte e avanço. Ambos ocorrem conforme um conjunto de parâmetros como direção, velocidade e percurso dos movimentos no espaço de trabalho.

A formação do cavaco durante o processo influencia em fatores como o desgaste da ferramenta, a variação dos esforços de corte e a geração de calor. Sua forma é irregular e pode ser contínua ou fragmentada. Esta varia de acordo com as condições de usinagem, a geometria da ferramenta e principalmente com o tipo de material sendo trabalhado (DINIZ, 2006).

Usinabilidade é uma propriedade relativa ao grau de dificuldade de se usinar um material, que pode ser expressa através de um índice comparativo. Ela depende essencialmente das características mecânicas do mesmo incluindo sua composição e operações aplicadas anteriormente. Além disso, as condições de usinagem também influenciam diretamente nessa grandeza (DINIZ, 2006).

O procedimento de usinagem em geral, segundo Rebeyka (2016), é realizado em duas etapas, sendo elas o desbaste e o acabamento. Na etapa de desbaste são removidas as primeiras camadas de material, com menor velocidade de corte e maior remoção de material possível conferindo eficiência ao processo. Na etapa de acabamento é feita a finalização da peça, com maior velocidade e remoção mínima de material. Esta permite a obtenção de precisão geométrica e dimensional, conforme a tolerância dimensional e o acabamento superficial definidos por projeto.

## Torneamento

A operação de torneamento se baseia em girar um sólido, ou material bruto, ao redor de um eixo e deslocar uma ferramenta de corte, ajustando comprimento e diâmetro para obter uma superfície de revolução com forma e dimensões bem definidas (CHIAVERINI, 1986a).

O torno mecânico é a máquina operatriz que realiza esse trabalho. As principais operações executadas são o faceamento, e os torneamentos externo e interno (REBEYKA, 2016). A Figura 3.7 mostra uma representação de algumas dessas operações.

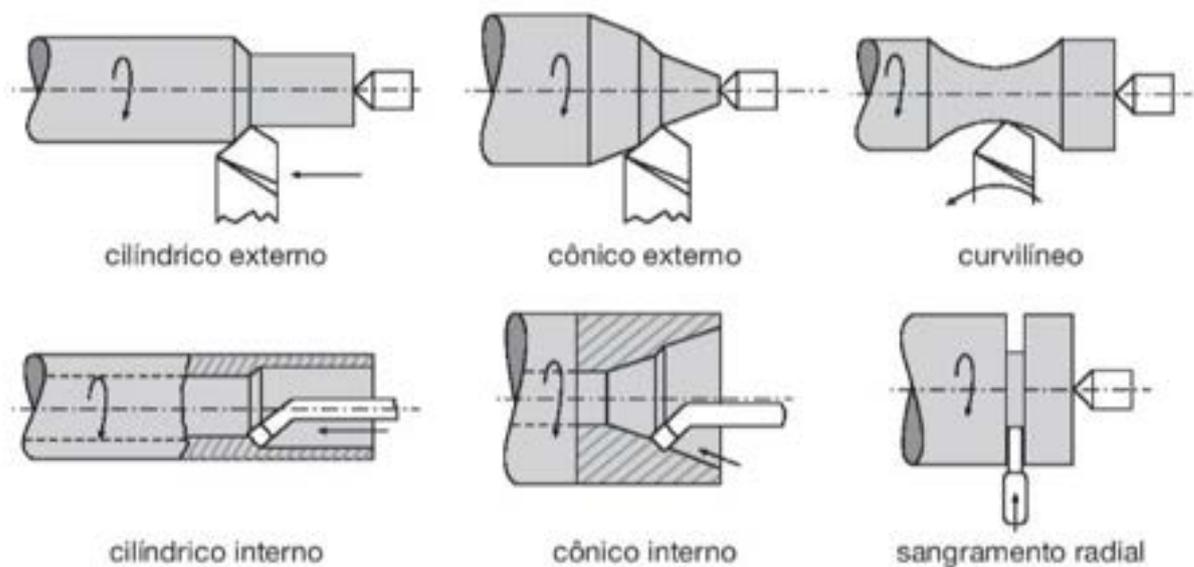


Figura 3.7 – Exemplos de operações de torneamento.

Fonte: Rebeyka (2016).

Uma série de parâmetros influenciam no processo e nos resultados obtidos. Os principais são a rotação, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. Estes são definidos de acordo com as ferramentas utilizadas, a geometria da peça e as características finais desejadas (REBEYKA, 2016).

## Fresamento

De acordo com Chiaverini (1986a) e Diniz (2006), o fresamento consiste em mover uma peça passando por uma ferramenta de corte giratória. Esta é denominada fresa, e possui a forma de um sólido de revolução com arestas de corte simétricas e equidistantes. O avanço da peça se dá no sentido contrário da rotação da ferramenta, que remove material

a cada revolução, acompanhando sua forma.

A máquina operatriz que realiza esse trabalho é a fresadora, que é classificada conforme a direção de seu eixo de rotação. Por esse processo, é possível obter superfícies com várias geometrias devido às diversas formas de fresa disponíveis e à versatilidade dos movimentos de corte no plano e no espaço cartesiano (CHIAVERINI, 1986a). Podem ser produzidas peças com planos, curvas, superfícies angulares, canais com perfis especiais e furos (REBEYKA, 2016). São modelos comuns de ferramenta:

- Fresa cilíndrica de dentes paralelos ou helicoidais.
- Fresas de perfil, utilizadas na fabricação de perfis especiais. Um exemplo é a fresa módulo para usinar dentes de engrenagens.
- Fresas cônicas, utilizadas para usinar ranhuras prismáticas e na confecção de ferramentas. A fresa rabo de andorinha é um exemplo desse modelo.
- Fresa para chanfro.

A Figura 3.8 enumera em ordem crescente representações do emprego desses modelos, respectivamente.

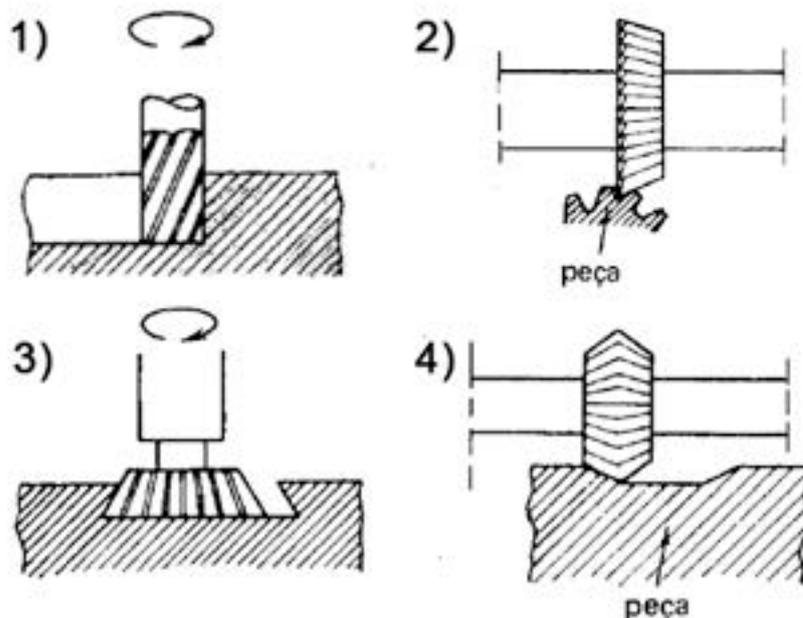


Figura 3.8 – Exemplos de operações de fresamento.

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986a).

Os principais parâmetros desse processo são a profundidade de usinagem, a largura de corte e a velocidade de avanço (REBEYKA, 2016).

### **Furação e Roscamento**

Segundo Chiaverini (1986a) e Diniz (2006), o processo de furação utiliza uma ferramenta de corte giratória denominada broca, geralmente cilíndrica com arestas de corte helicoidais, para a realização de furos em uma peça. O avanço é feito no sentido retilíneo do eixo de perfuração. Existe uma ampla variedade de diâmetros e modelos projetados para diferentes materiais de trabalho, como mostra a Figura 3.9. A operação de furação é cíclica, pois é necessária a retirada da broca para a remoção do cavaco, que se acumula.

A furadeira é uma máquina específica para a realização dessa operação, mas ela também pode ser feita em um torno ou uma fresadora, de acordo com a necessidade da aplicação (CHIAVERINI, 1986a).

O roscamento é o processo de usinar filetes de roscas internas em furos ou externas em superfícies cilíndricas, como mostra a Figura 3.9. No primeiro caso, a execução pode ser feita manualmente utilizando conjuntos de machos. Um torno com uma ferramenta adequada e um sistema de controle da velocidade de corte pode ser utilizado para produzir ambos os tipos. Existem padrões comerciais como os sistemas métrico e inglês, mas também podem ser produzidas roscas com dimensões personalizadas (REBEYKA, 2016).

### **Usinagem por máquinas CNC**

De acordo com Rebeyka (2016) e Fracaro (2017), os movimentos e operações de usinagem podem ser automatizados por processadores e atuadores em máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Trata-se de um equipamento capaz de receber e interpretar informações e transmitir instruções eletrônicas para a máquina. Os programas que definem a sequência de fabricação podem ser facilmente desenvolvidos e modificados de forma manual ou gerados via *softwares* de Desenho Assistido por Computador, do inglês *Computer-Aided Design* (CAD) e de Manufatura Auxiliada por Computador, do inglês *Computer-Aided Manufacturing* (CAM). Estes permitem a realização de simulações do processo para verificar a sequência de comandos e a presença de possíveis erros de forma segura.

A linguagem de programação padrão utilizada é o código G. Suas funções possuem

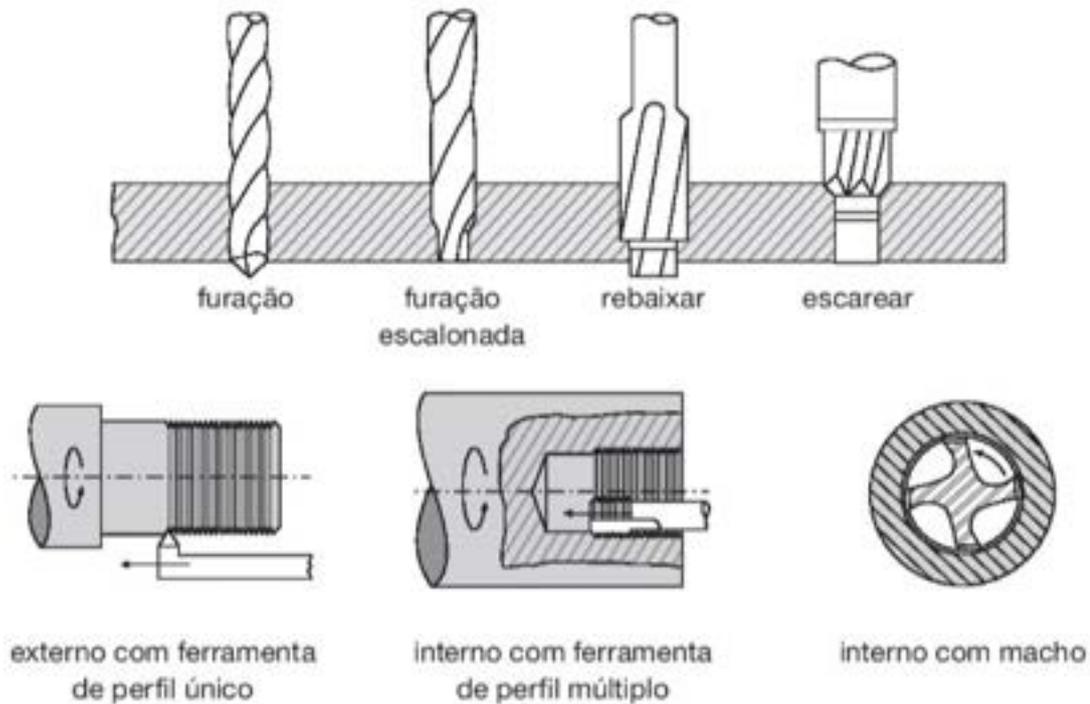


Figura 3.9 – Representação das operações de furação e roscamento.

Fonte: Adaptado de Rebeyka (2016).

sintaxes definidas por normas e muitos comandos são comuns a quase todas as máquinas. Os parâmetros de usinagem seguem os mesmos das operações convencionais. Uma vantagem da fabricação por máquinas CNC é a possibilidade aplicar funções matemáticas para gerar trajetórias e construir superfícies complexas (REBEYKA, 2016).

São utilizados sistemas de referência para a definição das coordenadas do processo de usinagem conhecidos como ponto zero-máquina, que é definido pelo fabricante, e zero-peça, escolhido pelo programador. Ferramentas também possuem um sistema de referência definido conforme seu formato (FRACARO, 2017). Os programas levam em conta a geometria da ferramenta a partir de dados de correção previamente armazenados (REBEYKA, 2016).

### 3.1.6 Manufatura Aditiva

De acordo com Wong e Hernandez (2012), a manufatura aditiva é o processo de criação de um objeto tridimensional através da produção de uma sequência de camadas. A prototipagem rápida é um dos métodos mais comuns, que utiliza a combinação de três tecnologias centrais, sendo elas as plataformas CAD, CAM e máquinas CNC. Com

isso, é possível criar quase qualquer forma, o que poderia ser difícil em outros processos de fabricação convencionais. Dependendo do material utilizado, podem ser produzidos diretamente produtos finais, além dos modelos e protótipos comuns.

A impressão 3D pelo método de Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM) é uma aplicação de manufatura aditiva em que um filamento de plástico alimenta um bico extrusor aquecido que o funde e o deposita em camadas de espessura configurada de acordo com a resolução da máquina. Trata-se de um processo de relativo baixo custo, cujo tempo de execução varia com o tamanho, complexidade e densidade da peça desejada (WONG; HERNANDEZ, 2012).

### 3.1.7 Materiais

#### Aços

Os aços são metais ferrosos utilizados em diversas aplicações de engenharia. Eles podem ser aços carbono ou ligas com outros elementos. Sua resistência mecânica, ductilidade e tenacidade variam conforme a composição química e a realização de tratamentos térmicos e mecânicos (CALLISTER, 2008).

A presença de elementos de liga como manganês, níquel, cobre, cromo e molibdênio altera as propriedades mecânicas do aço para ajuste de sua resistência a solicitações, ao desgaste, à oxidação e à corrosão em diferentes temperaturas. Já os tratamentos térmicos e químicos modificam as condições de deformação do material. Características como baixo custo e boa relação entre peso e resistência são desejáveis para aços estruturais e a dureza é um fator importante para os aços de alta usinabilidade, utilizados para processos de produção em massa (CHIAVERINI, 1986b).

#### Alumínio

O alumínio é um metal não ferroso que possui um baixo peso específico e boa resistência a corrosão, o que o torna adequado para a indústria mecânica, sobretudo para aplicações envolvendo veículos e equipamentos de transporte (CHIAVERINI, 1986b). Além disso, apresenta boa condutibilidade térmica e elétrica. Ele pode ser produzido com alto nível de pureza, ou constituir ligas trabalhadas mecanicamente ou fundidas (CALLISTER, 2008).

Segundo Norton (2013) e Chiaverini (1986b), a alta ductilidade do alumínio facilita seu processamento através de conformação mecânica e usinagem. Elementos de liga comuns como ferro, silício, molibdênio, manganês e cobre alteram suas propriedades físicas de acordo com diferentes necessidades. Como referência, as ligas de alumínio magnésio (série 5xxx) apresentam um bom equilíbrio entre características mecânicas, resistência à corrosão e usinabilidade.

## **Polímeros**

Os polímeros, também chamados de resinas, são materiais que possuem boas características mecânicas, são bons isolantes elétricos em geral e têm o carbono como principal elemento. Existem três principais tipos, sendo eles as fibras, com o tipo de ligação mais forte, os elastômeros, com a maior elasticidade e os plásticos, que são resistentes porém sofrem apenas deformações permanentes (CHIAVERINI, 1986b).

De acordo com Callister (2008) e Chiaverini (1986b), os principais tipos de plásticos são os termoestáveis e os termoplásticos. Os primeiros suportam maiores temperaturas após sua moldagem e solidificação, não havendo novamente o amolecimento do material. Os últimos podem ser deformados sob ação de calor e endurecem novamente quando resfriados, tendo como exemplos o Nylon e o plástico Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS).

O Nylon (PA) é um material com boa resistência à fadiga e solicitações como tração, choques e abrasão, sendo assim capaz de constituir componentes mecânicos de máquinas. Em contrapartida, ele possui uma elevada taxa de absorção de umidade, que é uma desvantagem para alguns ambientes de trabalho pois causa variações dimensionais (CHIAVERINI, 1986b).

O ABS possui rigidez e dureza razoáveis, além de ser resistente a choques. Trata-se de um elemento de fácil conformação por injeção, moldagem e extrusão (CHIAVERINI, 1986b). Este último é utilizado em processos de manufatura aditiva como a impressão 3D por FDM (WONG; HERNANDEZ, 2012). Ele pode ser utilizado para substituir peças metálicas em algumas aplicações.

## **Seleção de Materiais**

Para o projeto de uma peça, é desejável a escolha do material de menor custo e que apresente a melhor combinação de propriedades adequadas, levando em conta as técnicas

de fabricação necessárias (CALLISTER, 2008).

Uma metodologia foi proposta por Ashby (2012) para a seleção de materiais para construção mecânica. O primeiro passo consiste em verificar os requisitos de projeto e as funções de cada componente, listando quais condições devem ser cumpridas e quais são flexíveis ou livres. A partir das restrições estabelecidas, é realizada uma triagem, eliminando os materiais que não atendem aos requisitos. Posteriormente é feita uma lista classificando os mais adequados, de acordo com os objetivos principais. Por fim, através de uma busca pela documentação referente aos candidatos em manuais ou folhas de dados de fabricantes é feita a escolha final do material.

A Figura 3.10 mostra uma referência para a seleção de materiais a partir da relação entre peso e resistência para diferentes tipos de ligas e composições.

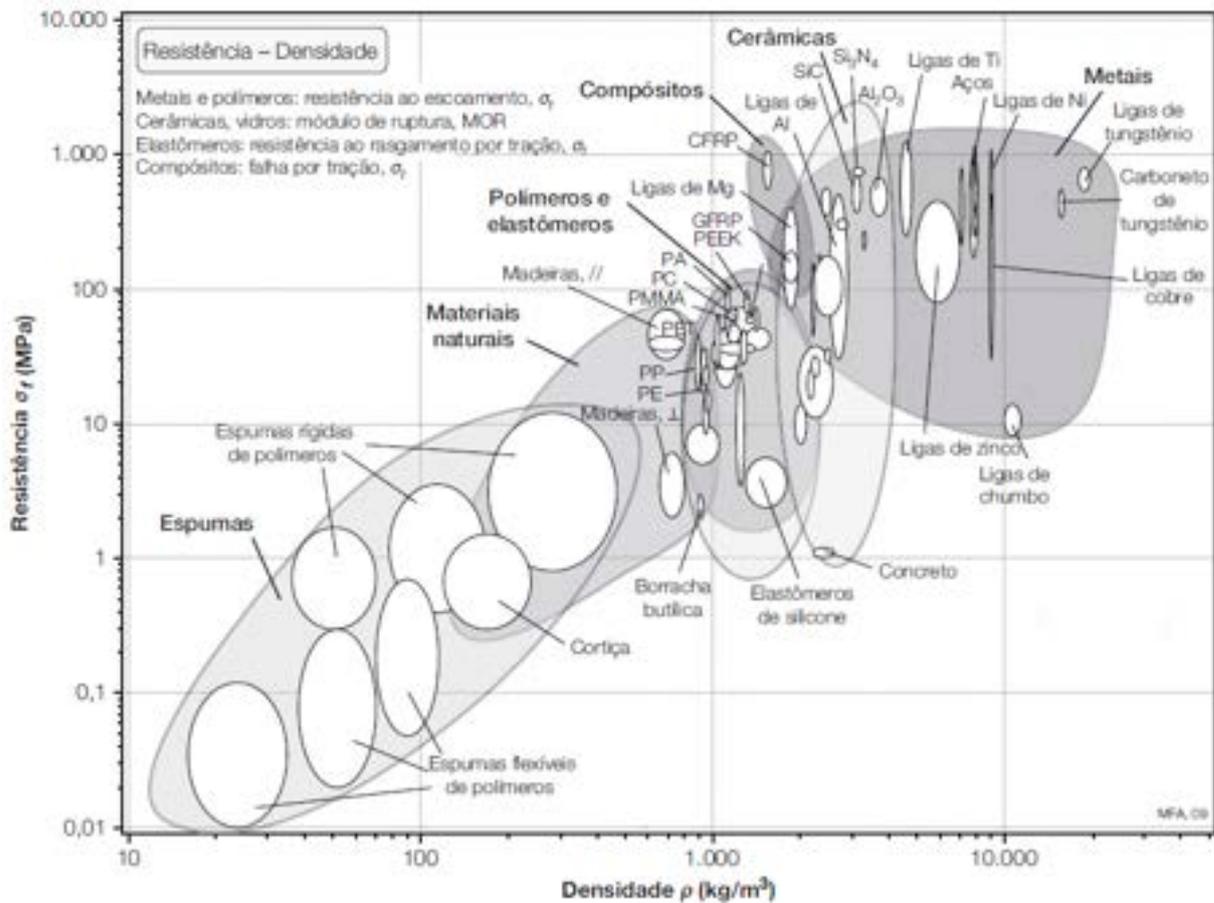


Figura 3.10 – Relação entre resistência específica e densidade para materiais de construção mecânica.

Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

## Resistência Mecânica

Os dados relativos às propriedades de um material são obtidos geralmente através de ensaios de amostras com controle das cargas aplicadas. Essas características apresentam uma variação estatística e por isso os valores fornecidos pelas documentações são considerados mínimos. Existem normas e padrões para procedimentos de teste específicos, sendo o ensaio de tração o mais comum (NORTON, 2013).

Foi visto em Norton (2013) que caso dados relativos à resistência ao cisalhamento dos materiais não estiverem disponíveis, é possível realizar uma aproximação conforme a equação 3.20, em que  $S_{ys}$  é o limite de escoamento no cisalhamento e  $S_y$  o limite de escoamento na tração.

$$S_{ys} = 0,577 S_y \quad (3.20)$$

A rigidez de um material representa a resistência do mesmo à deformação devido à tensão. Ela é definida pelo módulo de elasticidade  $E$  ou pelo índice de rigidez específica que consiste na razão deste com a densidade do material (NORTON, 2013).

A Tabela 3.7 organiza uma faixa de valores de resistência, densidade e rigidez para diferentes tipos de materiais. A Tabela 3.8 apresenta valores fornecidos por fabricantes para alguns materiais.

Tabela 3.7 – Densidade  $\rho$ , tensão limite de escoamento  $\sigma_y$  e módulo de elasticidade  $E$  para materiais.

Material	$\rho(g/cm^3)$	$\sigma_y(MPa)$	$E(GPa)$
Aços de baixo carbono	7,8 – 7,9	250 – 395	200 – 215
Aços de baixa liga	7,8 – 7,9	400 – 1100	201 – 217
Aços inoxidáveis	7,6 – 8,1	170 – 1000	189 – 210
Ligas de alumínio	2,5 – 2,9	30 – 500	68 – 82
Nylon	1,12 – 1,14	50 – 94,8	2,62 – 3,2
ABS	1,01 – 1,21	18,5 – 51	1,1 – 2,9

Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

### 3.1.8 Lubrificação

A redução do atrito na interface entre dois materiais pode ser feita pela introdução de um lubrificante. Este pode ser líquido ou sólido e possui como principais propriedades a

Tabela 3.8 – Características de materiais segundo dados de fabricantes.

Material	$\rho(g/cm^3)$	$\sigma_y(MPa)$
Alumínio 5052-O	2,7	65
Nylon 6.6	1,14	68
ABS	1,04	14,7

Fonte: Adaptado de Shockmetais (2020), Incomplast (2020) e 3DLab (2020).

alta resistência à compressão e a baixa resistência ao cisalhamento. Com isso, é formada uma camada de baixo atrito na superfície de deslizamento (NORTON, 2013). Outras funções exercidas pelos lubrificantes são a distribuição e dissipação de calor, prevenção de corrosão e proteção contra a interferência de resíduos externos (SHIGLEY, 2005).

Os lubrificantes sólidos, como o grafite, são empregados em situações nas quais existe uma dificuldade em manter líquidos nas superfícies e é necessária resistência a altas temperaturas. Os lubrificantes líquidos são os mais comumente utilizados. Estes são constituídos principalmente de óleos minerais derivados do petróleo e óleos sintéticos, sendo classificados conforme sua viscosidade e presença de aditivos (NORTON, 2013).

A lubrificação de um engrenamento deve ser feita pra evitar o desgaste e a falha prematura dos componentes (NORTON, 2013). Para condições de baixa velocidade e carregamento leve, pode ser utilizado um óleo de uso geral, aplicado periodicamente, ou uma graxa para longos períodos de operação sem interrupção (SHIGLEY, 2005).

## 3.2 Eletrônica

Como apresentado por Silva (2019) e também por Vaz (2019), foi desenvolvido um circuito eletrônico de comunicação para propósitos gerais entre a controladora C5G e uma placa microcontroladora Arduino. Ele consiste em um conversor de nível lógico isolado por fotoacoplador. O dimensionamento dos componentes foi feito com base nos níveis de tensão de referência das entradas e saídas digitais da controladora e da placa Arduino, sendo eles 0-24V e 0-5V, respectivamente.

A Placa de Circuito Impresso (PCI) confeccionada, mostrada a Figura 3.11, está disponível para uso no laboratório.

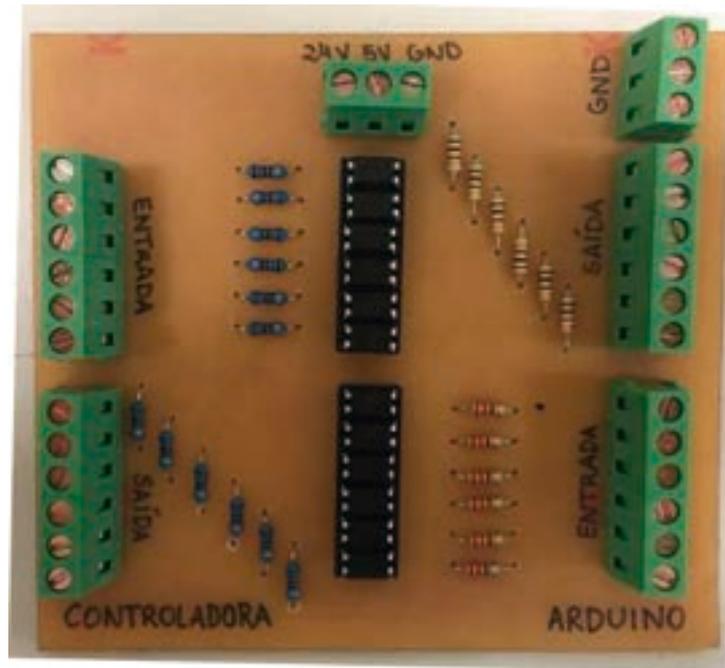


Figura 3.11 – PCI de interface utilizada em trabalhos anteriores.

Fonte: Vaz (2019).

### 3.3 Robótica

Define-se robótica como a ciência que estuda a conexão inteligente entre percepção e ação (SICILIANO, 2008). Ela está ligada ao estudo dos robôs, máquinas capazes de substituir humanos na execução de tarefas que exigem tanto esforço físico quanto tomadas de decisão. Portanto, trata-se de um tema interdisciplinar que abrange as áreas de mecânica, controle, eletrônica e computação (SICILIANO, 2009).

Segundo Corke (2011), um robô é uma máquina orientada por objetivos que pode sentir, planejar e agir. Essa percepção é feita com base na extração de dados dos sensores, que conectados a uma arquitetura de processamento e controle permite o cálculo e execução de ações adequadas.

Robôs são classificados principalmente por sua estrutura mecânica, que pode ser montada em base fixa ou móvel. Aqueles que se enquadram no primeiro caso são denominados manipuladores. Estes foram desenvolvidos com o objetivo de replicar a mecânica de um braço humano (SICILIANO, 2009).

Manipuladores robóticos são constituídos de uma sequência de *links* rígidos conectados por juntas, sendo estas acopladas aos atuadores, que por sua vez são responsáveis

pelos movimentos. Esse conjunto forma uma cadeia cinemática aberta, o que favorece a obtenção de modelos e o projeto dos sistemas de controle. Cada junta, sendo rotacional ou prismática, fornece à estrutura um único Grau de Liberdade (GDL). Para manipular um objeto em uma posição e orientação definidas são necessários 6 GDL. Além disso, a porção do ambiente ao alcance da ferramenta do robô é denominada espaço de trabalho (SPONG, 2006).

### 3.3.1 Matriz de transformação homogênea

A representação de transformações de rotação e translação em relação a um *frame* de referência e em um espaço tridimensional pode ser expressa através de uma matriz 4x4 como mostra a seguinte Equação (SPONG, 2006):

$$H = \begin{bmatrix} R_{3x3} & d_{3x1} \\ f_{1x3} & s_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \textit{Rotation} & \textit{Translation} \\ \textit{Perspective} & \textit{Scale factor} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Nela,  $R_{3x3}$  é uma submatriz que representa a rotação e  $d_{3x1}$  representa o deslocamento ou translação.  $f_{1x3}$  e  $s_{1x1}$  são responsáveis por ajustes de perspectiva e escala, respectivamente, porém estes geralmente não são utilizados nesse contexto. Assim, usa-se  $f = 0$  e  $s = 1$  (SPONG, 2006).

Essa matriz é utilizada na modelagem de manipuladores robóticos, pois consiste em uma forma eficiente de representar os movimentos de todas as juntas da cadeia cinemática (SPONG, 2006). Nessa representação, relações de transformação de translação e rotação, normalmente complexas, compostas por somas de produtos de vetores (3x1) e matrizes (3x3), são simplificados para apenas multiplicações de matrizes homogêneas. Além disso, pode ser utilizada para acrescentar a transformação do Ponto Central da Ferramenta, do inglês *Tool Center Point* (TCP), que que é um ponto fictício que representa a origem do *frame* da ferramenta, em relação ao referencial final do flange do robô.

### 3.3.2 Comau Smart5 SiX

Como citado no primeiro capítulo desse documento, na unidade de Divinópolis do CEFET-MG se encontra disponível um manipulador industrial COMAU Smart5 SiX, conforme mostra a Figura 3.12. A Tabela 3.9 mostra algumas das principais especificações técnicas do robô. A Figura 3.13 mostra o detalhamento mecânico do flange, peça em que



Figura 3.12 – Robô COMAU Smart5 SiX do CEFET-MG, unidade Divinópolis.

Fonte: Próprio autor. <sup>1</sup>

Tabela 3.9 – Características e performance do manipulador COMAU Smart5 SiX 6-14.

Característica	Valor
Estrutura	Antropomórfica
Número de GDL	6
Carga máxima no punho	6kg
Carga adicional no braço	10kg
Alcance máximo horizontal	1400mm
Repetibilidade	+/- 0,05mm

Fonte: Adaptado de Comau (2005).

são fixadas as ferramentas, por meio de 4 parafusos M6 e um ressalto para referência de encaixe da ferramenta.

<sup>1</sup> A partir deste ponto, para evitar repetições, subentende-se que os recursos não referenciados são de própria autoria.

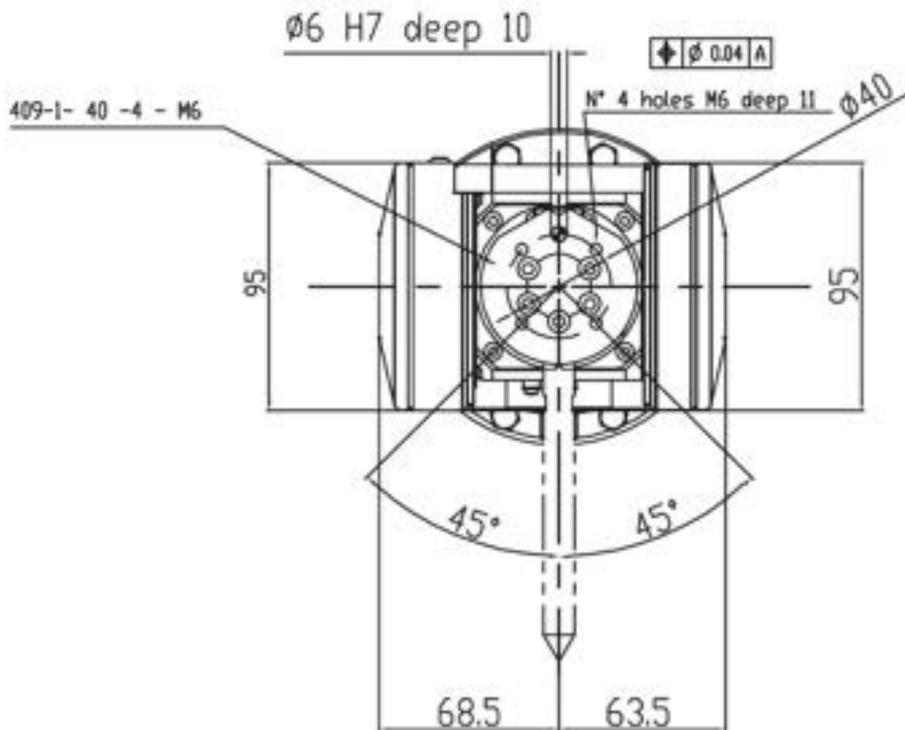


Figura 3.13 – Detalhamento do flange do robô, utilizado para fixação de ferramentas.

Fonte: Comau (2005).

## 3.4 Softwares

Nesta seção são apresentadas as principais plataformas, linguagens e programas utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3.4.1 Software de modelagem 3D

Um software de modelagem 3D é uma ferramenta CAD para o desenho de elementos sólidos, geralmente com uma ampla variedade de recursos para a criação de geometrias e montagens interativas de peças em 2D e 3D. Também é possível gerar documentos com desenhos técnicos e características de montagem para fabricação.

### 3.4.2 Visual Studio Code

O VS Code é um editor de código gratuito desenvolvido pela Microsoft. Ele consiste em uma ferramenta de suporte para programação, com recursos de depuração, destaque seletivo e complemento de sintaxes para diversas linguagens, além de ser expansível

pela instalação de extensões (VSCODE, 2021). O software encontra-se disponível para Windows e outros sistemas operacionais. A Figura 3.14 mostra sua interface.

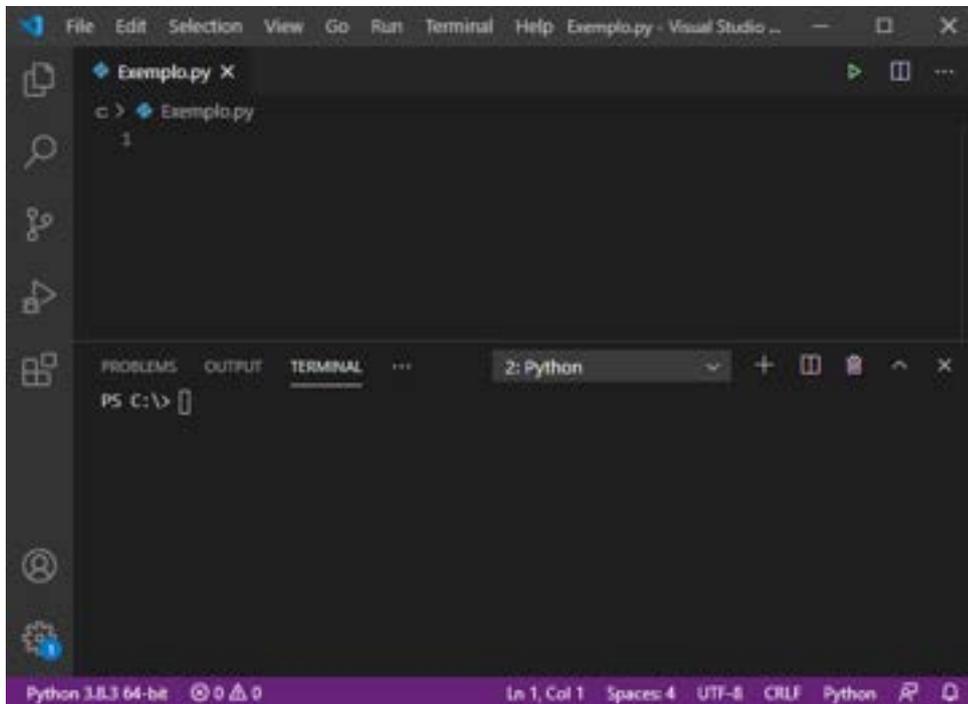


Figura 3.14 – Interface principal do software VS Code.

Fonte: Captura de tela no sistema operacional Windows 10.

### 3.4.3 ROS

O *Robot Operating System* (ROS) é um *framework* de código aberto que oferece uma estrutura com ferramentas, bibliotecas e convenções para simplificar o processo de desenvolvimento de aplicações complexas de robótica de forma robusta (ROS, 2020). Ele é compatível com diversas plataformas e as lógicas programadas podem ser utilizadas em diferentes sistemas, através da substituição das bibliotecas nativas. Seus recursos vem sendo construídos pela colaboração de diversas empresas e laboratórios de pesquisa.

### 3.4.4 Arduino

O nome Arduino se refere tanto ao Ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês *Integrated Development Environment* (IDE), quanto ao hardware que consiste em uma placa reprogramável com um microcontrolador. O primeiro possui código aberto e fornece uma interface entre um computador e um dos modelos de placa disponíveis (ARDUINO,

2020). Estes apresentam capacidades variadas, mas de forma geral interagem com dispositivos e sensores através de suas entradas (analógicas e digitais) e saídas (digitais), de acordo com o código carregado. A linguagem nativa utilizada é orientada a objetos, possui métodos próprios e se assemelha ao C++ e a comunicação é feita através de um canal serial USB.

### 3.4.5 Protocolo TCP/IP

De acordo com Kurose (2013), existem dois importantes protocolos de controle do envio e recebimento de informações em uma rede de computadores, sendo eles o Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês *Transmission Control Protocol* (TCP) e o Protocolo da Internet, do inglês *Internet Protocol* (IP). O primeiro opera em uma camada de transporte e é orientado à conexão, ou seja, depende do estabelecimento de uma via de comunicação entre o Servidor e o Cliente. Isso é feito através de uma interface de software denominada *socket*. O segundo define o formato dos pacotes transmitidos entre roteadores e sistemas finais. Assim, os principais protocolos são conhecidos como TCP/IP.

O modelo TCP inclui a execução de um serviço confiável de transferência de dados, que garante o recebimento das informações sem erros no conteúdo e na sequência ordenada. A conexão também permite o envio e recebimento de dados simultaneamente. Além disso, existe um mecanismo de controle de congestionamento por meio da limitação da capacidade de transmissão em caso de eventuais problemas (KUROSE, 2013).

### 3.4.6 WinC5G e PDL2

O software WinC5G é um ambiente de desenvolvimento de algoritmos na linguagem PDL2, que é derivada da linguagem Pascal, acrescida de comandos nativos de controle para os manipuladores da Comau. Ele inclui uma função de depuração do código e um banco de dados com propostas de solução para erros comuns encontrados. Além disso, permite exportar os algoritmos do formato *.pdl* para *.cod*, com as instruções e *.var*, com os valores das variáveis, que são interpretados pela controladora C5G (COMAU, 2014). A Figura 3.15 mostra a interface principal e alguns exemplos de instruções.

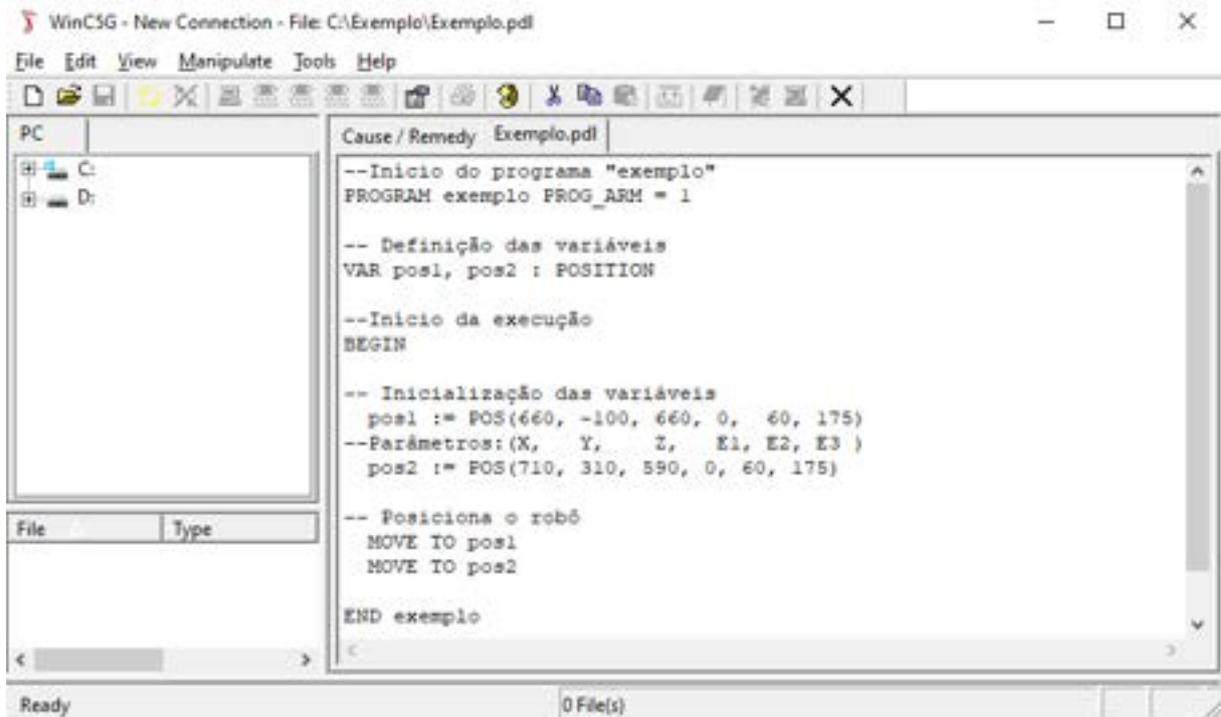


Figura 3.15 – Interface principal do software WinC5G.

Fonte: Captura de tela no sistema operacional Windows 10.

## Desenvolvimento

Este capítulo descreve os procedimentos adotados durante a elaboração deste TCC. A primeira seção apresenta os passos para a execução das atividades propostas, além dos recursos utilizados, como dispositivos e *softwares*. Em sequência, são descritas as etapas realizadas visando alcançar os objetivos definidos. Materiais desenvolvidos como códigos e desenhos de projeto estão disponíveis no apêndice do documento.

### 4.1 Materiais e Métodos

Conforme apresentado no capítulo de introdução deste documento, o problema abordado é essencialmente modular, ou seja, seu desenvolvimento pode ser dividido em diferentes sistemas, e as tarefas são executadas pela interação adequada entre os mesmos.

Devido às restrições impostas pela condição de isolamento social, foi atribuído a este trabalho o desenvolvimento do **primeiro módulo**, referente ao projeto da ferramenta de manipulação e demais aspectos necessários à sua estrutura, necessária para sua integração ao robô industrial.

A Figura 4.1 mostra uma visão geral da interação entre os módulos. O computador externo é responsável pela comunicação direta com uma câmera. Ele realiza o processamento das imagens de forma a identificar a posição e a orientação dos cubos e converte essa informação em coordenadas em relação ao *frame* da base do robô.

Através de uma rede sem fio local, pelo protocolo TCP/IP, essas coordenadas são transmitidas ao APC, que por sua vez é responsável por interpretá-las e convertê-las para a linguagem da controladora. Esta recebe os dados por meio de um protocolo *Ethernet*

*Powerlink*, com uma frequência de comunicação de  $2,5\text{ kHz}$ , realiza a movimentação do robô e solicita o acionamento da garra, conforme o necessário, através de suas entradas e saídas digitais.

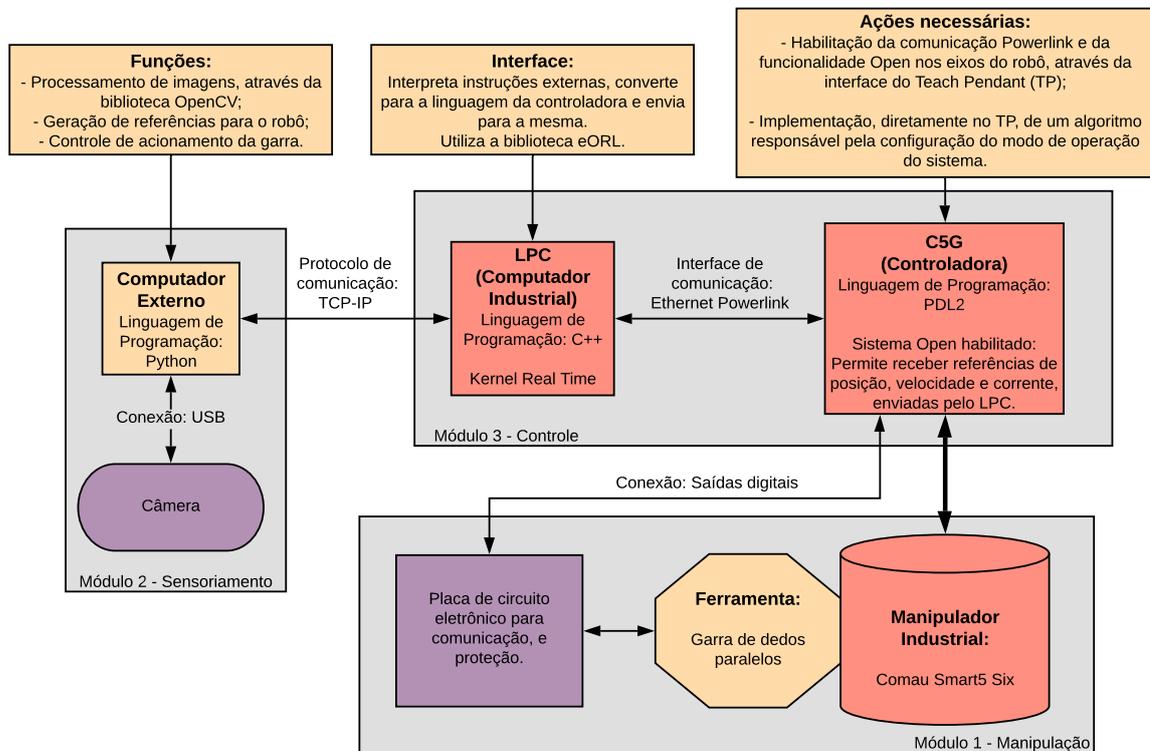


Figura 4.1 – Diagrama ilustrando o funcionamento completo do projeto.

É importante deixar claro que os módulos 2 e 3 passaram a ser propostas de continuidade para esse trabalho. Tendo isso em vista, as atividades foram divididas e orientadas de acordo com os objetivos propostos, com foco no projeto, construção e programação da ferramenta do tipo garra.

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica para verificar os métodos utilizados em trabalhos relacionados, além do estado atual de desenvolvimento da área. Em seguida, foi feito um levantamento contínuo de referências para a obtenção de uma fundamentação teórica adequada, explorando temas relativos à robótica, linguagens de programação, protocolos de comunicação, eletrônica, elementos de máquinas, materiais para construção mecânica e processos de fabricação. Com base no material teórico estudado, a metodologia para a execução das etapas específicas do desenvolvimento são descritas nas seções a seguir.

## 4.2 Projeto da Ferramenta

A primeira etapa aborda o projeto da garra robótica, a ser acoplada ao manipulador industrial. Foi definida que esta seria uma garra de propósito geral, que atenda à necessidade da tarefa e tenha flexibilidade para uso em aplicações futuras. Foram feitos estudos iniciais para verificar o funcionamento de modelos comerciais desse tipo de ferramenta, através dos catálogos de fabricantes como a Schunk (2020), a Gimatic (2020) e a Zimmer (2020), que mostram uma ampla variedade de sistemas.

A partir dessas informações, foi escolhido como tipo de atuador o motor elétrico de corrente contínua, devido à sua simplicidade e controlabilidade. Este dispensa a demanda por equipamentos extras, que é uma desvantagem dos sistemas pneumáticos. Além disso, é mais versátil que um eletro-ímã, que manipula apenas certos tipos de materiais metálicos, e um sistema à vácuo, que é adequado para contato com superfícies lisas (TODD, 1986).

Em seguida, foi definida a estrutura base do projeto. Usando como referência um modelo Gimatic MPLM, foram escolhidas a conversão de movimento por fusos e engrenagens e o tipo de superfície de apoio como dois dedos paralelos, justificados pela simplicidade, dimensões reduzidas e a possibilidade de manter fixa a posição do TCP. A Figura 4.2 mostra o desenho CAD da garra em questão, apresentado pelo fabricante.

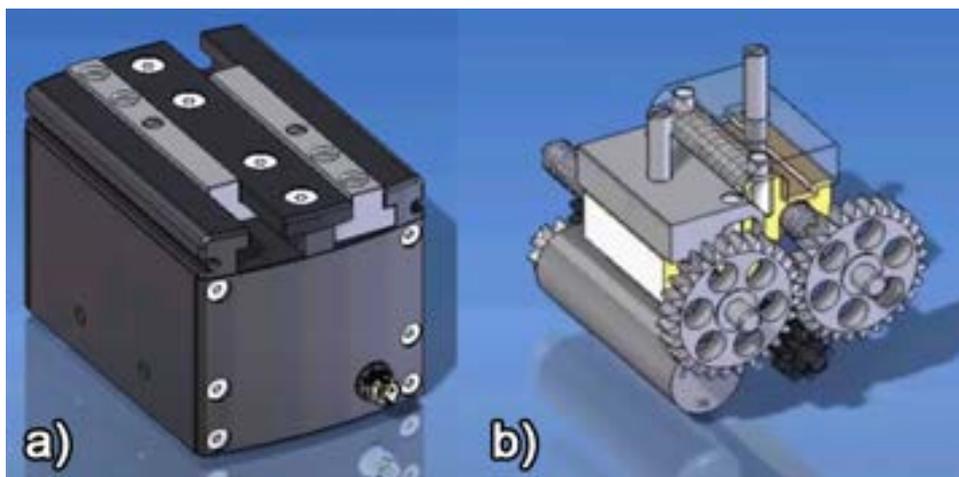


Figura 4.2 – Modelo 3D da garra Gimatic. a) Vista exterior. b) Vista interior.

Fonte: Adaptado de Gimatic (2013).

O projeto, dimensionamento das peças e escolha dos materiais foram feitos a partir do estudo do referencial teórico e pela avaliação das ferramentas de fabricação disponíveis

nos laboratórios de Mecânica e Usinagem CNC do CEFET-MG / Unidade de Divinópolis, visando a redução do custo de construção.

A especificação do circuito eletrônico de acionamento leva em consideração que sua interface com a controladora do robô será feita através de entradas e saídas digitais. Em relação aos *softwares*, foram utilizados uma ferramenta de modelagem 3D para o desenho das peças do projeto e o ambiente de programação Arduino 1.8.10 para a elaboração dos algoritmos de controle. A IDE Visual Studio Code foi utilizada com a linguagem Python 3.8.3 e as bibliotecas *numpy* 1.19.0 e *matplotlib* 3.3.2 para a realização de cálculos e plotagem de gráficos, respectivamente.

A Tabela 4.1 mostra os passos do desenvolvimento.

Tabela 4.1 – Organização das fases de projeto da ferramenta.

Fase	Descrição
Mecânica	
1	Listagem das especificações
2	Definição dos sistemas estruturais
3	Pré-dimensionamento
4	Análise das solicitações mecânicas
5	Dimensionamento das peças
6	Geração de desenhos de projeto e montagem
7	Fabricação e construção
Eletrônica	
8	Especificação dos componentes eletrônicos
9	Montagem dos circuitos
Programação	
10	Desenvolvimento do software de acionamento
Geral	
11	Testes e validação do funcionamento
12	Listagem de componentes e custos

## 4.3 Mecânica

### 4.3.1 Listagem das especificações

Nessa fase, foram definidas as seguintes características:

- A soma do peso da garra e da carga não devem ultrapassar o limite do manipulador especificado como 6 kg. Logo é desejável a utilização de materiais leves para as peças.
- Abertura máxima de 100 mm, para permitir a manipulação dos cubos de 50 mm de lado e dispor de espaço extra para outras aplicações.
- Carga máxima de 0,5 kg, pois as aplicações do laboratório não envolvem objetos com peso superior.
- Acionamento eletrônico recebe comandos da controladora utilizando uma placa de comunicação como interface, devido à diferença nos níveis de tensão de referência.

### 4.3.2 Definição dos sistemas estruturais

A principal diretriz utilizada nessa fase foi a escolha da geometria mais simples possível para as peças, tendo em vista os processos de fabricação a serem empregados.

#### Mecanismo de movimentação dos dedos

Primeiramente, a conversão da rotação do motor na translação dos dedos, feita através de fuso e castanha, depende de dois recursos para um funcionamento adequado, sendo eles uma guia linear e um conjunto de engrenagens.

A presença de uma guia linear é necessária para restringir o grau de liberdade rotacional do bloco de suporte para a castanha. Foi verificada a disponibilidade de uma fresa adequada para usinar uma guia de deslizamento linear do tipo "rabo de andorinha", com diâmetro de  $20mm$ , ângulo de  $60^\circ$  e altura de  $8mm$ . Essa estrutura é comumente utilizada em máquinas CNC, através de uma interface metálica lubrificada.

Um par de engrenagens permite que o sentido de rotação do subsistema de cada dedo seja oposto. Considerando que a direção da rosca dos fusos será a mesma, tem-se assim o movimento contrário dos dedos para a abertura e o fechamento da garra. Para essa aplicação, engrenagens cilíndricas de dentes retos são apropriadas. A presença de folgas no engrenamento não é um problema significativo, visto que o sistema não depende de um controle de posição preciso. Também foi verificada a disponibilidade de uma fresa módulo de  $1,5mm$  para a usinagem de engrenagens desse tipo. Sua fabricação é acessível pelos equipamentos do CEFET.

Foi decidida a aquisição dos fusos e castanhas necessários em modelos comerciais, pois é mais viável do que fabricar os mesmos. Para isso foi escolhido o modelo TR8 de aço inoxidável com  $8\text{mm}$  de diâmetro, rosca trapezoidal com ângulo de  $30^\circ$  e  $8\text{mm}$  de passo, para garantir que não ocorra deflexão do fuso e também uma boa velocidade linear. O material da castanha é o latão.

Foi definida também a utilização de rolamentos simples para os mancais, com estes usinados nas paredes externas da estrutura. O modelo escolhido foi o 625 Zz, com diâmetros interno e externo de  $5$  e  $16\text{mm}$  e lateral de  $5\text{mm}$ , devido ao baixo custo e dimensões compactas compatíveis com o projeto.

### Acoplamento para o Manipulador

A fixação da ferramenta ao flange do robô será feita através de uma peça intermediária, dimensionada com base nas informações do manual de especificações técnicas do manipulador Comau. O objetivo dessa peça é facilitar o acoplamento e desacoplamento para não comprometer o processo de troca de ferramenta.

### 4.3.3 Pré-dimensionamento

Inicialmente, com base na especificação de carga foram calculadas as forças exigidas do sistema para que não ocorra o deslizamento do objeto manipulado em relação aos dedos da garra durante a tarefa. Os cálculos foram feitos utilizando um cubo como base. A Figura 4.3 mostra um diagrama com a análise inicial.

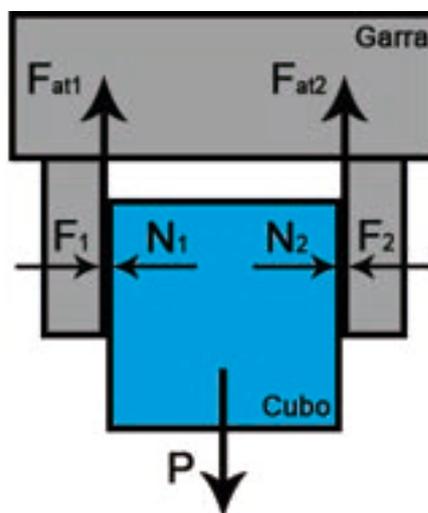


Figura 4.3 – Diagrama de equilíbrio de forças para uma posição de manipulação vertical.

Considerando o eixo horizontal como  $x$  e o vertical como  $y$  tem-se, pelo equilíbrio de forças em  $x$ , que  $F_1 = F_2 = F$ . Tem-se também que  $F_1 = N_1$  e  $F_2 = N_2$ , Sendo  $N$  a força normal em reação à  $F$ . Para o equilíbrio em  $y$ :

$$F_{at1} + F_{at2} = P \quad (4.1)$$

O lado esquerdo da Equação 4.1 corresponde ao atrito nas superfícies de contato entre os dedos da garra e o cubo. O peso deste é representado por  $P$ . Utilizando a Equação 3.1 e resolvendo para  $F$ , obtém-se a força de prensão mínima necessária para segurar o bloco nessa posição:

$$F_{min} = \frac{P}{2\mu_s} \quad (4.2)$$

Analisando agora na perspectiva da Figura 4.4, pode-se calcular a força necessária para garantir que não ocorra o deslizamento do cubo durante a manipulação, pois é importante que sua orientação permaneça a mesma do TCP.

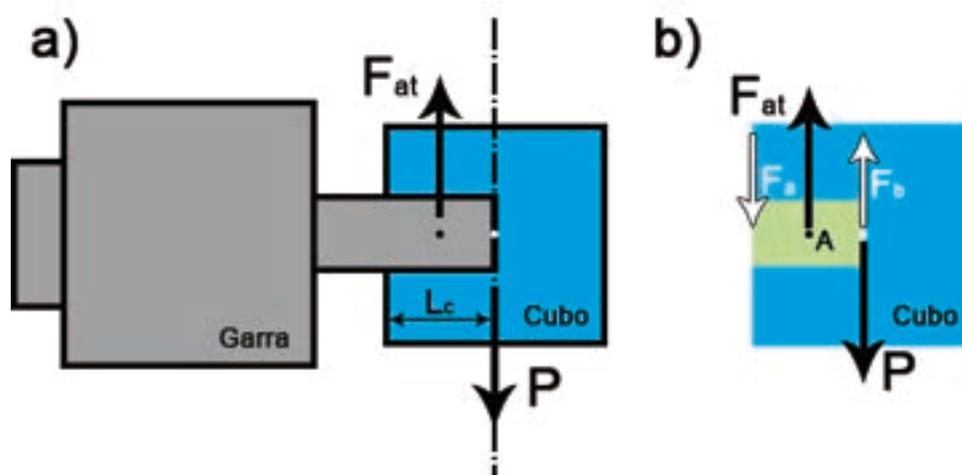


Figura 4.4 – Diagrama de equilíbrio de forças e momentos para uma posição de manipulação horizontal. a) Vista lateral. b) DCL.

Pela análise do diagrama 4.4b, pode-se verificar o equilíbrio de momentos no centroide do contato (ponto A). O binário formado na região de atrito por  $F_a = F_b = F_{bin}$  é calculado pela Equação 3.2.

$$\sum M_A = \frac{L}{2} F_{bin} - \frac{L}{4} P = 0 \Rightarrow F_{bin} = \frac{P}{2} \quad (4.3)$$

Na Equação 4.3, o limite do contato  $L_c$  é considerado no centro do cubo. A expressão 4.4 apresenta uma forma mais geral, para  $0 \leq L_c \leq L$ .

$$\sum M_A = L_c F_{bin} - \frac{L - L_c}{2} P = 0 \Rightarrow F_{bin} = \frac{L - L_c}{2L_c} P \quad (4.4)$$

Observe que  $F_{at}$  representa a soma das componentes  $F_{at1} + F_{at2}$ . Da mesma maneira,  $F_{bin}$  é uma força de atrito que representa o contato de ambos os lados do cubo. Considerando isso e aplicando novamente a Equação 3.1:

$$F_p \geq \frac{F_{bin}}{2\mu_s} \Rightarrow F_p \geq \frac{L - L_c}{4\mu_s L_c} P \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 representa a força de prensão  $F_p$  necessária de ser exercida no cubo pelos dedos da garra para que não ocorra deslizamento entre eles. Para o caso de  $L_c = L/2$ ,  $F_p = F_{min}/2$ .

Em seguida, foi obtida uma relação entre as dimensões da ferramenta e a especificação de abertura máxima da mesma. A Figura 4.5 representa a estrutura escolhida. É desejável que a ferramenta seja compacta. Essa disposição ocupa um espaço reduzido e demanda menores componentes no sistema de transmissão, o que justifica seu uso.

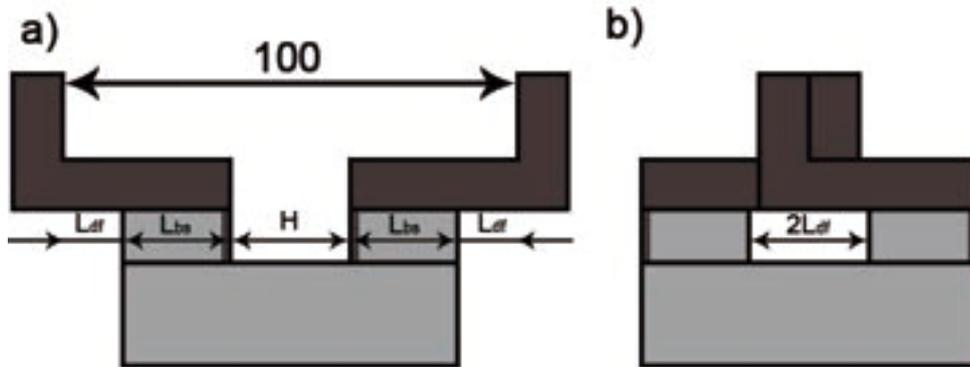


Figura 4.5 – Representação da vista frontal da garra. a) Abertura máxima. b) Completamente fechada.

A Equação 4.6 relaciona as variáveis apresentadas na Figura 4.5a, com dimensões em milímetros.

$$2L_{df} + 2L_{bs} + H = 100 \quad (4.6)$$

Da Figura 4.5b, tem-se que  $H = 2L_{df}$ , logo:

$$L_{df} = 25 - \frac{L_{bs}}{2} \quad (4.7)$$

#### 4.3.4 Análise das solicitações mecânicas

Nessa fase, foram analisados os principais esforços envolvendo os componentes mecânicos da garra.

##### Suporte para castanha e peças dos dedos

A Figura 4.6 mostra a configuração definida para os dedos e blocos de suporte para castanha. O deslocamento lateral  $L_{dl}$  é necessário para que haja o alinhamento central do contato. Por esse motivo, os dedos foram divididos em duas peças para facilitar a fabricação.

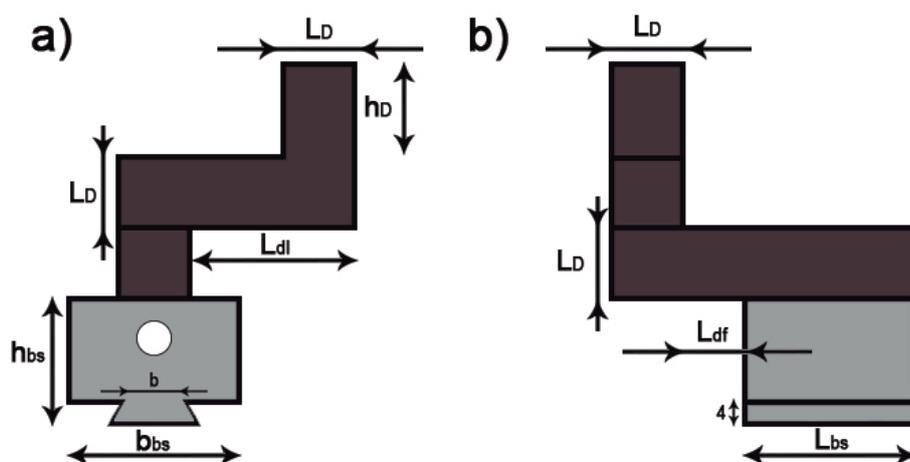


Figura 4.6 – Representação do conjunto bloco suporte para castanha e peças de um dedo. a) Vista lateral. b) Vista frontal.

Para simplificar os cálculos foi considerada a aplicação da força  $F$  no vértice superior direito da vista "a" na Figura 4.6. Primeiramente, analisando a seção que forma a interface entre as peças do dedo, tem-se as tensões normal, de flexão e de cisalhamento por flexão e por torção, conforme as Equações 4.8 e 4.9. Os cálculos empregam dimensões em milímetros e desconsideram o peso próprio das peças.

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_F = \frac{P/2}{L_d^2} + \frac{6F_p(L_D + h_D)}{L_D^3} \quad (4.8)$$

$$\tau = \tau_F + \tau_T = \frac{3F_p}{2L_D^2} + \frac{4,8F_p(L_{dl} + L_D/2)}{L_D^3} \quad (4.9)$$

Ao ser definido um valor de tensão admissível, pode-se utilizar essas equações para encontrar uma seção quadrada mínima que suporte as solicitações calculadas.

O próximo ponto de análise é menor seção de apoio na interface da guia linear com o bloco de suporte para castanha. Nela serão observadas tensões semelhantes ao caso anterior. Através de um processo análogo foram obtidas as Equações 4.10 e 4.11:

$$\sigma = \frac{P/2}{bL_{bs}} + \frac{6F_p(h_D + 2L_D + h_{bs} - 4)}{bL_{bs}^2} \quad (4.10)$$

$$\tau = \frac{3F_p}{2bL_{bs}} + F_p(L_{dl} + L_D/2) \frac{3b + 1,8L_{bs}}{b^2L_{bs}^2} \quad (4.11)$$

Através dessas equações foi obtida a área mínima de uma seção retangular central que suporte as solicitações calculadas.

### Torque exigido do sistema

Aplicando os valores conhecidos pela especificação do fuso nas Equações 3.12 e 3.13, foi obtida uma relação do torque necessário no engrenamento para que ocorra a transmissão do movimento.

$$M_{T,v} \approx 10^{-3}(6F_p + 2R) \quad (4.12)$$

$$M_{T,h} \approx 6 \times 10^{-3}(F_p + m_t) \quad (4.13)$$

Os cálculos foram feitos considerando dimensões em metros e o atrito da rosca  $\mu$  como o da interface entre aço e latão conforme a Tabela 3.3. As duas análises consideram diferentes condições de manipulação, sendo elas o deslocamento vertical e horizontal da carga, respectivamente. O maior valor dentre os resultados deve ser utilizado como referência para o torque  $T$ .

### Seção circular do fuso

É necessário que o diâmetro externo do fuso seja usinado nas extremidades de forma que a superfície circular resultante coincida com o diâmetro interno de  $5mm$  dos rola-

mentos dos mancais. A Equação 4.14 representa o cálculo da torção em  $MPa$  na seção transversal circular usinada, com base no torque  $T$ , em  $N m$ .

$$\tau_T = 4,0744 \times 10^7 T \quad (4.14)$$

### 4.3.5 Dimensionamento das peças

Os cálculos realizados nessa fase foram feitos tendo como referência um cubo de  $L = 50mm$  e  $P = 0,5kg$ . Utilizando as Equações 4.2, 4.4 e 4.5 pode-se analisar em função do limite do contato ( $L_c$ ) as forças exigidas do sistema, como mostra a Figura 4.7.

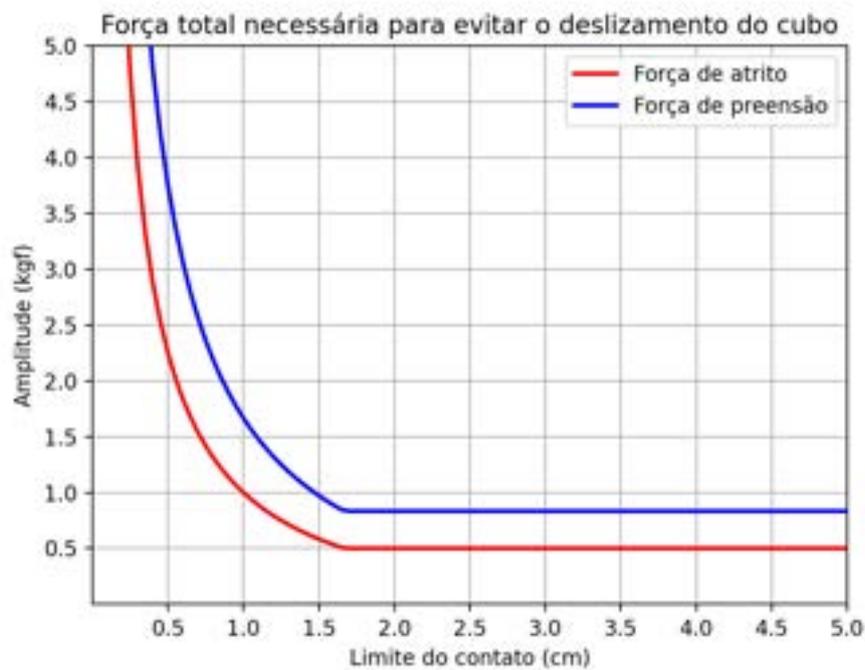


Figura 4.7 – Comparação entre a força de atrito e a força de prensão necessárias para a manipulação do cubo.

O coeficiente de atrito  $u_s$  na interface entre os dedos e o objeto foi considerado como 0,3. Para possibilitar um alcance máximo de  $L_c = 40mm$ , definiu-se:

$$h_D = 40mm \quad (4.15)$$

Com base no gráfico da Figura 4.7, será utilizada como referência uma força  $F_p = 1,5kgf$ , para permitir a manipulação do cubo com  $L_c \geq 10mm$ .

### Escolha dos materiais

Conforme a metodologia proposta na Seção 3.1.7, foram definidos os materiais para a fabricação das peças da ferramenta:

- Os requisitos de projeto consistem nas especificações listadas no início do processo.
- Todos os componentes mecânicos da ferramenta ou transmitem força e torque ou fornecem apoio de forma a realizar a função da garra. A principal condição a ser cumprida é que eles sejam capazes de suportar as cargas previstas.
- Um requisito estabelecido foi o isolamento elétrico entre a garra e o objeto manipulado.
- O objetivo principal é a obtenção de uma estrutura compacta e leve.

Com base nessas informações, tem-se que os materiais com boa relação entre resistência mecânica e densidade são bons candidatos para a aplicação. A partir da experiência ao longo do curso e do estudo realizado, foi constatado que o alumínio e o nylon são materiais com essa característica, o que pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 3.10. Além disso, características como baixo custo, fácil acesso e usinabilidade alta justificam a escolha.

Foi definida a fabricação das peças dos dedos em nylon, para atender ao requisito definido. A princípio, as engrenagens seriam também fabricadas em nylon, devido a seu baixo coeficiente de atrito e boa resistência mecânica. Porém, comparando pela rigidez, o alumínio é muito superior e foi decidida a utilização da liga ANBT 5052. O problema do atrito pode ser resolvido pela lubrificação das superfícies de contato.

Da mesma maneira, foi definida a utilização da mesma liga de alumínio para os blocos de suporte para castanha e para os componentes estruturais como as paredes externas e a guia linear, de forma a garantir a resistência mecânica e permitir a fixação através de roscas e parafusos.

### Tensões Admissíveis

Utilizando os dados das Tabelas 3.7 e 3.8, além da Equação 3.20, foi obtida a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tensões admissíveis dos materiais para o projeto.

Material	$\sigma_{adm}(MPa)$	$\tau_{adm}(MPa)$
Alumínio 5052-O	21,67	12,50
Nylon 6.6	22,67	13,07

Foi utilizado um coeficiente de segurança  $S_F = 3$ , conforme foi proposto na Seção 3.1.2. Dessa forma, considerou-se que os modelos matemáticos utilizados são aproximações, assim como os dados obtidos dos materiais, por não haver a possibilidade de realizar testes na prática. Do mesmo modo, considerando que o gráfico da Figura 4.7 resulta de uma análise em condições estáticas, aplicou-se o fator também à referência da força de prensão para levar em conta as cargas dinâmicas da manipulação. Obteve-se assim uma nova  $F$  de  $4,5kgf$ .

### Peças dos dedos

Manipulando as Equações 4.8 e 4.9 foi obtido:

$$\sigma_{adm}L_D^3 - (6F + P/2)L_D - 6Fh_D = 0 \quad (4.16)$$

$$\tau_{adm}L_D^3 - 3,9FL_D - 4,8FL_{dl} = 0 \quad (4.17)$$

Para a realização dos cálculos, foram consideradas forças em  $N$ , dimensões em  $mm$  e  $L_{dl} \leq 25mm$ . As raízes reais dos polinômios indicam  $L_D = 8,3mm$  e  $L_D = 8mm$ . Utilizando o maior valor, obteve-se uma seção transversal quadrada mínima para as peças dos dedos:

$$L_D \geq 8,3mm \quad (4.18)$$

Foi utilizado  $L_D = 20mm$ , para permitir a fixação através dos parafusos e aumentar a superfície de contato com os objetos manipulados.

### Suporte para castanha

Nesse ponto, é necessário definir valores iniciais para  $h_{bs}$  e  $L_{bs}$ , pois estas são decisões de projeto com apenas algumas limitações.

Primeiramente, considerando a altura de  $4mm$  do perfil prismático da entrada da guia linear e o diâmetro do furo para o fuso, de  $8mm$ , foi definido:

$$h_{bs} = 38mm \quad (4.19)$$

Em seguida, escolheu-se:

$$L_{bs} = 35mm \quad (4.20)$$

Pelas Equações 4.10 e 4.11, tem-se:

$$b \geq \frac{6F(h_D + 2L_D + h_{bs} - 4) + L_{bs}P/2}{\sigma_{adm}L_{bs}^2} \quad (4.21)$$

$$\tau_{adm}b^3 - \frac{3F}{2L_{bs}}b^2 - \frac{3FC}{L_{bs}^3}b - \frac{1,8FC}{L_{bs}^2} = 0 \quad (4.22)$$

Sendo  $C = L_{dl} + L_D/2$ . Da primeira expressão obtém-se  $b \geq 1,2mm$  e da segunda,  $b \geq 0,6mm$ . Assim, foi encontrada uma espessura mínima para a seção retangular em análise:

$$b \geq 1,2mm \quad (4.23)$$

Com isso, pode-se definir  $b_{bs}$  e  $b$  de forma a atender à restrição imposta pela Equação 4.23. A base menor do trapézio da entrada para a guia linear, que é o próprio  $b$ , foi definida como  $20mm$ , considerando as dimensões da fresa "rabo de andorinha", para permitir a fabricação com tolerância dimensional adequada. Assim, foi determinado:

$$b_{bs} = 36mm. \quad (4.24)$$

Utilizando como informação a densidade dos materiais e volumes aproximados, foi possível calcular a massa do conjunto bloco de suporte e peças do dedo da seguinte maneira:

$$m_{con} = m_{bs} + m_D = 1,14V_D + 2,7V_{bs} \approx 0,20kg \quad (4.25)$$

### Guia linear

Com a definição de  $L_{bs}$ , através das Equações 4.6 e 4.7 pode-se calcular  $L_{df} = 7,5mm$  e  $H = 15mm$ . Com isso, tem-se o comprimento da guia:

$$L_{gl} = 2L_{bs} + H = 85mm \quad (4.26)$$

A Figura 4.8 mostra o perfil da guia deslizante linear a ser fabricada.

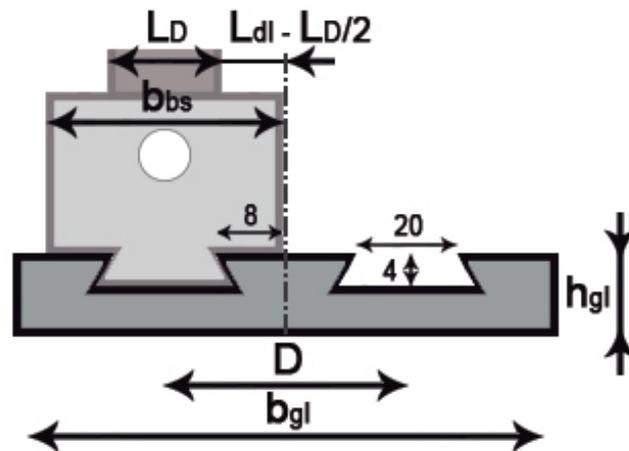


Figura 4.8 – Representação da vista lateral da guia de deslizamento linear.

Para essa disposição, é previsto um ajuste na fabricação para evitar o atrito entre os blocos de suporte durante o movimento. Analisando a Figura, tem-se que:

$$L_{dl} = \frac{b_{bs}}{2} = 18mm. \quad (4.27)$$

Além disso, pela simetria, foi encontrado o valor da distância entre os centros dos perfis:

$$D = 2 \left( \frac{b_{bs}}{2} \right) = 36mm. \quad (4.28)$$

A variável  $b_{gl}$  foi definida conforme a necessidade para a fixação da guia nas paredes externas e foi apresentada no detalhamento final.

### Especificação do motor

Através do cálculo do torque exigido do sistema, pelas Equações 4.12 e 4.13, pode-se especificar um motor de Corrente Contínua (CC) para atuar como fonte de potência do

mesmo. Tendo sido calculada a massa do conjunto do bloco de suporte e das peças dos dedos, pode-se definir a força de resistência ao movimento:

$$m_t = m_{bs} + m_D + P = 0,7kg \quad (4.29)$$

$$R = m_t g = 6,87N \quad (4.30)$$

Com isso, para a análise estática, pode-se traçar um gráfico do torque em função da força de prensão, por meio das Equações 4.12 e 4.13, como mostra a Figura 4.9. Por essa análise, deduziu-se que o maior torque necessário para produzir a força de prensão de referência de  $F = 4,5kgf$  é  $T = 2,84 kgf\ cm$ . Com base nessa informação foi especificado o motor com características apresentadas pela Tabela 4.3 e pela Figura 4.10. Foi escolhido um motor com *encoder* integrado para permitir um controle de posicionamento simples.

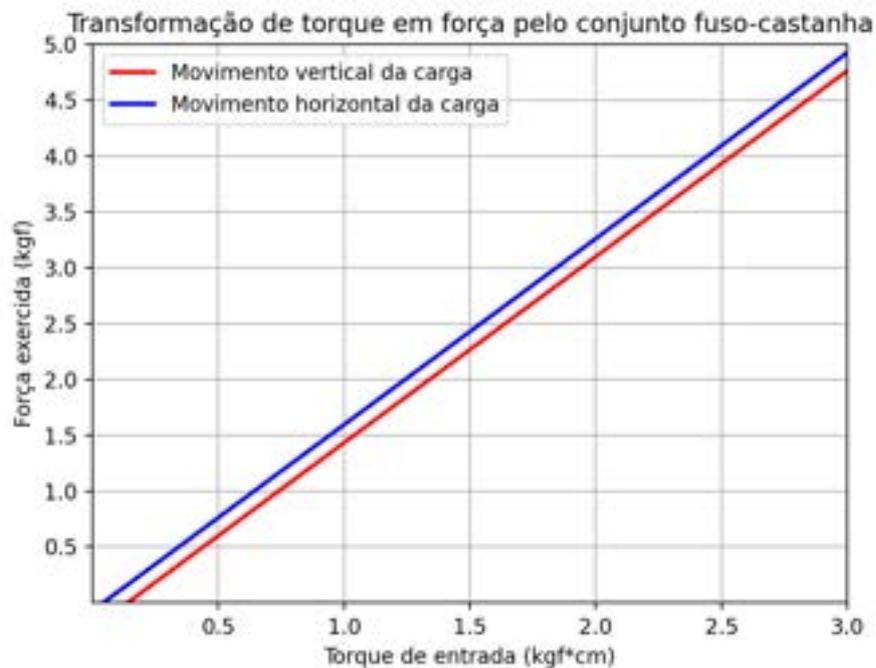


Figura 4.9 – Relação de transformação entre torque e força de prensão para as condições do projeto.

Tabela 4.3 – Especificações técnicas do motor CC.

Característica	Valor
Tensão nominal	6V
Operação em vazio	100RPM (0,13A)
Eficiência máxima	1kgf cm / 80RPM(0,5A)
Torque máximo	3kgf cm / 55RPM(1A)
Corrente de rotor bloqueado	3A
Razão de redução	1:75
Resolução	823,1PPR

Fonte: Adaptado de Eletrônica (2021).

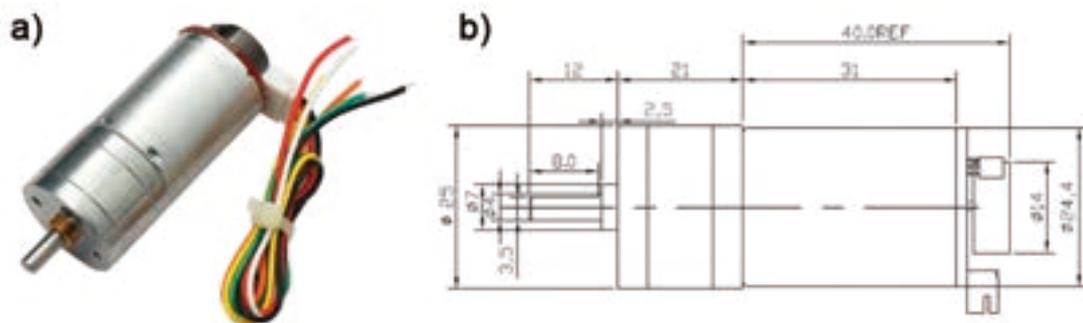


Figura 4.10 – a) Motor especificado. b) Detalhamento das dimensões.

Fonte: Adaptado de Eletrônica (2021).

### Seção transversal do fuso

Aplicando na Equação 4.14 o torque de referência obtido e convertendo para newton-metro, tem-se:

$$\tau_T = \frac{2,84}{10,2} (4,0743 \times 10^7) = 11,34 MPa \quad (4.31)$$

Dados sobre o tipo de aço que compõe o fuso não estão disponíveis. Assim, utilizando o valor mínimo da Tabela 3.7, com o coeficiente de segurança estabelecido, e aplicando na Equação 3.20, foi obtida uma tensão admissível de cisalhamento de  $\tau_{adm} = 32,7 MPa$ . Logo não há problemas quanto à capacidade do fuso de suportar a solicitação calculada.

## Engrenagens

Foi determinado anteriormente a distância entre os centros  $D = 36mm$ , em relação ao perfil prismático da guia linear e também aos eixos dos fusos. A partir dessa informação, foi possível definir a geometria das engrenagens.

Pela Equação 3.15, tem-se que o torque em ambos os fusos será o mesmo se ambas as engrenagens apresentarem o mesmo número de dentes, desprezando as perdas de potência no engrenamento. Sendo assim, foram utilizadas engrenagens com a mesma geometria. Através da equação da distância entre centros, da Tabela 3.4, foi obtido  $d_p = 36mm$ . Além disso, considerando que a ferramenta para usinagem dos dentes possui um módulo de  $m = 1,5mm$ , foi obtido  $Z = 24$  dentes.

Pela equação de flexão Lewis pode-se dimensionar o comprimento do dente ( $l$ ). O cálculo do fator de velocidade  $K_v$  foi feito conforme a Equação 3.18, com base na rotação máxima do motor especificado:

$$K_v = \frac{6,1 + 100 \frac{2\pi}{60} \frac{36 \times 10^{-3}}{2}}{6,1} = 1,03 \quad (4.32)$$

A tensão admissível calculada pela Equação 3.19 é essencialmente a mesma da Tabela 4.2 para a liga de alumínio especificada. Pela Tabela 3.6, tem-se que  $Y = 0,337$ . Como a Equação 3.17 utiliza dimensões em milímetros, é necessário converter o torque ( $T$ ) para newton-milímetro. Sendo feitas essas considerações, foi obtido:

$$l \geq \frac{K_v 2T / d_p}{\sigma_{adm} m Y} \Rightarrow l \geq 1,5mm \quad (4.33)$$

Tendo isso em vista, foi utilizado  $l = 10mm$ . A fixação das engrenagens nos respectivos eixos foi feita através de um parafuso radial em uma extensão cilíndrica do comprimento das mesmas.

Para esse projeto, a espessura da base da guia linear ( $h_{gl}$ ) foi dimensionada de forma que a distância entre os centros do eixo do motor, posicionado abaixo da mesma, e de um dos fusos seja equivalente a  $D$ . Assim, o torque poderá ser transferido do mesmo para os fusos através de uma engrenagem com as mesmas dimensões determinadas.

### Interface com o flange

Utilizando como base o detalhamento fornecido pela Figura 3.13, proveniente do manual de especificações técnicas da Comau, foi desenvolvida uma peça para realizar a montagem da garra no manipulador. Esta é fixada diretamente no flange através de parafusos axiais. Em seguida, a estrutura da ferramenta é fixada sobre ela, com parafusos também axiais, porém no sentido oposto. Com isso, o processo de acoplamento e desacoplamento pode ocorrer de forma simples e rápida.

### Suportes

Foi definida a fabricação em ABS dos componentes que não sofrerão solicitações mecânicas significativas, como o suporte de fixação dos componentes eletrônicos e as partes estéticas. Isso pelo processo de impressão 3D, devido ao baixo custo e liberdade de formas para modelagem.

#### 4.3.6 Geração de desenhos de projeto e montagem

Tendo como referência as características apresentadas nessa seção, foi utilizado um *software* de modelagem 3D para o desenho das peças e geração das folhas de detalhamento. As tolerâncias dimensionais foram definidas conforme a Tabela A.1 do Apêndice A e pelo estudo da norma NBR 5168 (ABNT, 1995).

O capítulo Resultados e Discussões mostra as estruturas finais definidas e o Apêndice A mostra os desenhos de projeto das peças.

## 4.4 Fabricação e Construção

Devido à condição de isolamento social, não foi possível utilizar os laboratórios do CEFET para a fabricação das peças projetadas. Tendo isso em vista, o Prof. Dr. Cláudio Parreira Lopes se disponibilizou a adquirir os materiais e fabricar as peças para a construção da garra.

Esta seção ilustra os passos do processo de fabricação, feitos com base nos desenhos de projeto. A Figura 4.11 mostra as engrenagens cilíndricas de dentes retos, fabricadas por torneamento e fresamento de uma barra circular de alumínio. Também são mostradas

as peças dos dedos, fabricadas pelo fresamento de barras de Nylon, de acordo com os materiais encontrados no comércio local.



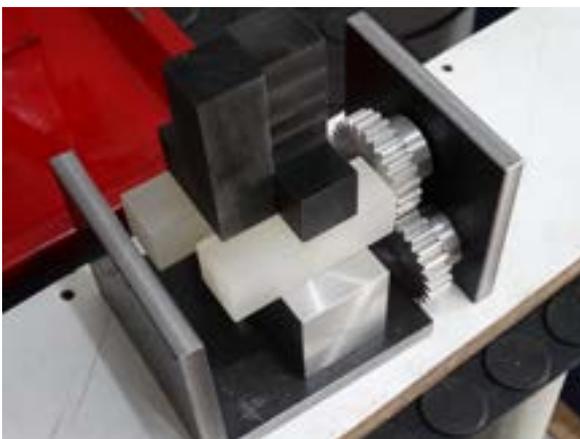
(a) Engrenagem do fuso.



(b) Dedos da garra divididos em duas peças e conjunto de engrenagens.

Figura 4.11 – Engrenagens e peças dos dedos.

A Figura 4.12 apresenta os principais componentes estruturais, sendo eles as paredes laterais, a base inferior e a guia de deslizamento linear do tipo "rabo de andorinha". Estes foram fabricados com base em uma chapa de aço reaproveitada, de  $8mm$  de espessura, no lugar do alumínio especificado no projeto. Essa substituição não prejudica o funcionamento da ferramenta, pois as características mecânicas do aço são superiores às do alumínio, porém causa um aumento significativo de peso, por serem as maiores peças em volume. Também foram fresados os encaixes para os rolamentos dos mancais.



(a) Paredes laterais e base inferior.

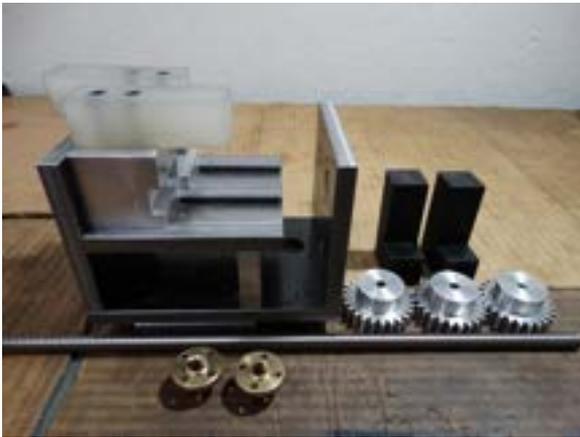


(b) Guia linear e fixação dos rolamentos.

Figura 4.12 – Estrutura principal e início da fabricação dos blocos de suporte.

A Figura 4.13 mostra os blocos de suporte para castanha finalizados, fabricados principalmente por torneamento e fresamento em alumínio. Também são mostrados o fuso trapezoidal TR8 e as castanhas adquiridas. A montagem do conjunto de translação pode ser vista na Figura 4.13b.

A Figura 4.14 apresenta a finalização das engrenagens com a usinagem das roscas dos parafusos radiais de fixação. A engrenagem do motor foi dividida em 3 peças de acordo com a disponibilidade de material. Pela Figura 4.14a é possível observar à direita um cilindro de nylon e um eixo de aço que foram utilizados como suporte. Também foram fabricados o suporte para o motor, em alumínio, e a peça de interface com o flange, em aço, como mostra a Figura 4.14b.



(a) Fuso trapezoidal e castanhas.



(b) Montagem dos blocos de suporte para castanha nos fusos.

Figura 4.13 – Conjunto de transmissão de força e movimento.

A fixação dos componentes foi feita através de parafusos do tipo sextavado interno, nos tamanhos comerciais M4 e M5. Parafusos M3 foram utilizados nas peças superiores dos dedos, para fixação das castanhas nos blocos e do motor no suporte. Para a fixação das engrenagens, foram utilizados parafusos M5 sem-cabeça. A ferramenta é acoplada ao flange do manipulador por parafusos M6. A Figura 4.15 mostra a conclusão da fabricação das peças e a montagem parcial dos componentes.



(a) Engrenagens finalizadas.



(b) Suporte para o motor e acoplamento para o flange.

Figura 4.14 – Etapa final da fabricação.

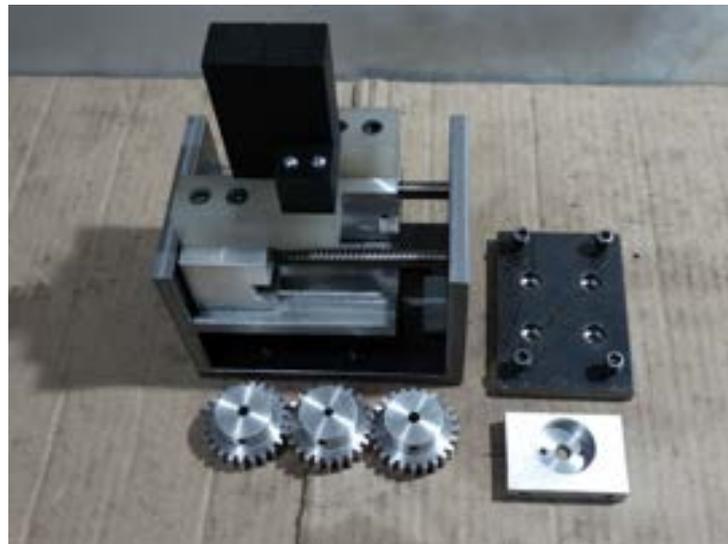


Figura 4.15 – Conclusão do processo de fabricação.

## 4.5 Eletrônica

### 4.5.1 Especificação dos componentes eletrônicos

Como elemento central responsável pelo controle do acionamento, processamento de sinais e comunicação com o sistema externo foi escolhido um Arduino Nano V3, em função do baixo custo, tamanho reduzido e facilidade de programação. Este pode ser alimentado por uma tensão externa de 7 a 12V. Além disso, esse modelo possui um terminal de alimentação de 3,3V, que é a tensão nominal do circuito do *encoder* do motor CC especificado (ARDUINO, 2021).

Para permitir uma flexibilidade na alimentação do sistema, foi necessário um regulador de tensão XL4015. Este possui uma faixa de operação de tensão de 1,5 a 32V para entradas entre 8 e 36V. Além disso, a corrente de saída máxima é de 5A, atendendo à capacidade máxima do motor (XLSEMI, 2021).

O controle de velocidade e sentido de rotação do motor é feito através de um módulo de Ponte H dupla L298N. Este pode ser alimentado com uma tensão entre 7 e 35V e possui dois canais com limite de corrente de 2A. Segundo STMicroelectronics (2000), é possível fazer uma ligação em paralelo dos canais para obter uma saída de corrente máxima de 4A, atendendo também à demanda do motor.

A indicação de que um objeto foi pego ou que um dos fins de curso foram alcançados será feita através da leitura de velocidade aferida pelo *encoder*. Para permitir a futura implementação de uma malha de controle fechada para a força de prensão, será utilizado um sensor ACS712-30A (ALLEGRO, 2006) para a leitura da variação da corrente do motor. Os contatos elétricos para a entrada de alimentação e para o envio e recebimento de sinais foram organizados utilizando um conector do tipo Mike de 8 vias.

## 4.5.2 Montagem dos circuitos

### Circuito de Controle

Para facilitar a desmontagem do circuito da ferramenta em caso de eventuais manutenções, foi feita uma placa central com o Arduino e uma série de conectores. Esta foi feita pela soldagem manual desses componentes em uma PCI ilhada de 3x7 cm, como mostra a Figura 4.16.

O comprimento da placa foi ajustado para 5,5 cm. As portas analógicas de A2 à A5 não foram utilizadas na aplicação, mas foram deixadas disponíveis para uso. É possível utilizá-las como saída analógica, por intermédio de um circuito resistor-capacitor. Na Figura 4.17, pode-se observar um esquemático completo do circuito de controle. Os esquemáticos desta seção foram construídos na plataforma online gratuita EasyEDA.

Através de testes, foi percebido que ocorre uma queda de tensão entre a alimentação da ponte H e os terminais do motor. Tendo isso em vista, a tensão foi regulada manualmente até a obtenção de 6V no máximo na saída do canal. Assim, foi identificada a tensão de operação de 8,1V para o circuito. A alimentação deste é feita através do regulador, tendo

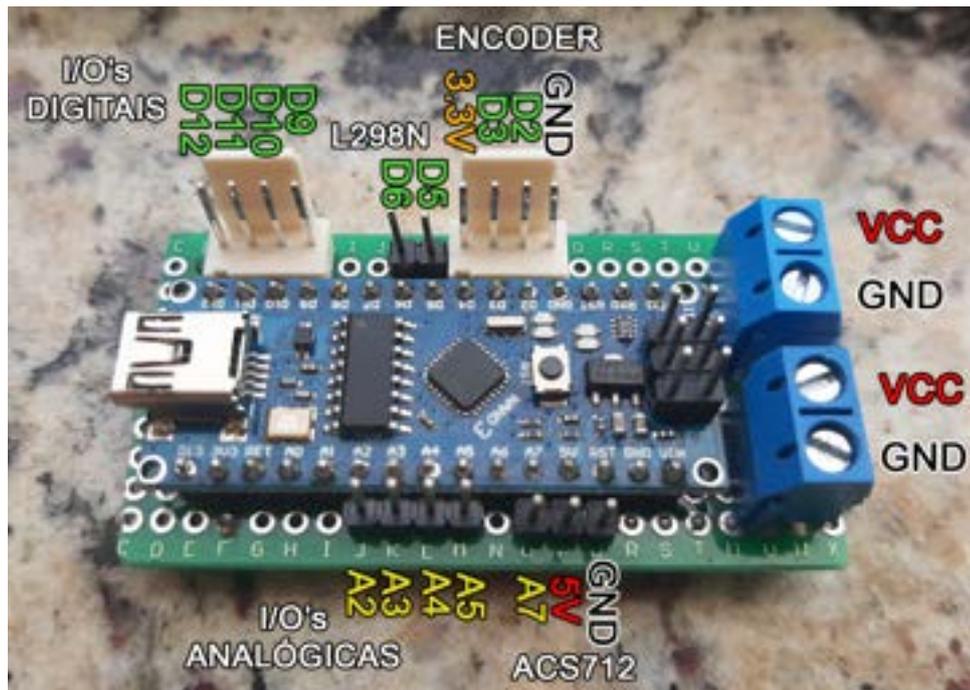


Figura 4.16 – Placa central para o controle de acionamento da ferramenta.

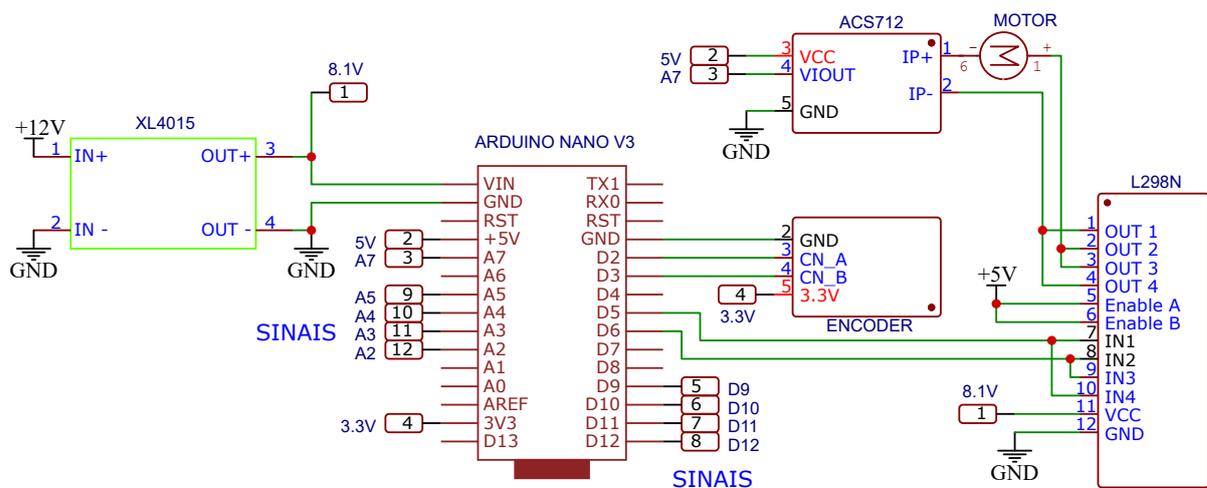


Figura 4.17 – Circuito completo.

este como entrada uma tensão de 9 a 36V, proveniente de uma fonte com capacidade de corrente superior a 3A.

O modelo 3D de um suporte para a fixação dos componentes eletrônicos, com exceção do regulador de tensão, que opera externamente, foi desenvolvido por meio do *software* de modelagem e foi produzido por um processo de impressão 3D.

## Placa de Comunicação

Como visto na Seção 3.2, as tensões de referência para os níveis lógicos da controladora e do Arduino são diferentes, sendo elas 24V e 5V, respectivamente. Para solucionar esse problema de comunicação, foi feita a placa de conversão de nível lógico da Figura 3.11. A intenção inicial para o presente trabalho era utilizar essa placa. Porém, pela realização de testes, foi percebido que sua operação é inadequada para a aplicação.

A placa em questão mantém a tensão de nível alto ativa ao mesmo tempo nas entradas e nas saídas por meio de resistores *pull-up*. Sua lógica consiste em aplicar um sinal de nível lógico baixo na saída, quando o mesmo ocorrer na entrada, para ambos os sentidos de comunicação. O problema ocorre no sentido da controladora para o Arduino.

De acordo com o manual do módulo de saídas digitais da controladora, estas são do tipo *Source* (B&R, 2021a). Logo, elas fornecem corrente quando conectadas ao potencial negativo da fonte e, no caso do módulo DO6322, bloqueiam a mesma no sentido oposto. Considerando isso, foi produzida uma nova placa, com as mesmas características de projeto, porém com uma lógica oposta de funcionamento e um número reduzido de canais, sendo 4 entradas e 2 saídas em relação à garra. A Figura 4.18 mostra o esquemático do circuito.

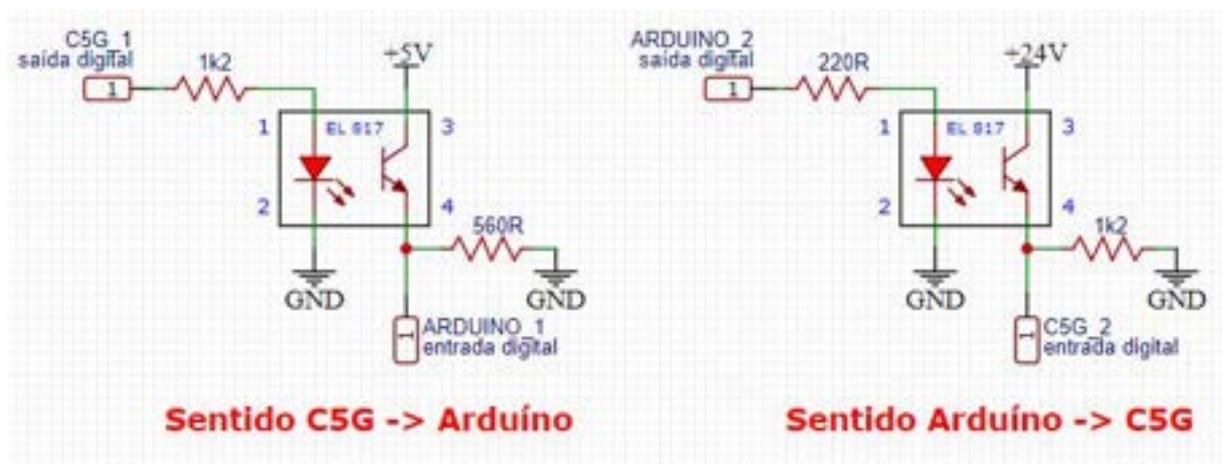


Figura 4.18 – Esquemático dos canais de comunicação, nos dois sentidos, do circuito conversor de nível lógico.

A placa foi montada e soldada manualmente em uma PCI ilhada. Foram utilizados os seguintes componentes:

- 6 CI's EL817
- 4 Socket's de 6 pinos
- 5 Bournes de 3 vias
- 1 Bourne de 2 vias
- 6 Resistores  $1,2\text{ k}\Omega$  - 1W
- 2 Resistores  $220\Omega$  -  $1/4\text{W}$
- 4 Resistores  $560\Omega$  -  $1/4\text{W}$
- 1 PCI ilhada - 4x6 cm

Em seguida, foi feita uma validação do funcionamento, nos dois sentidos de comunicação, utilizando uma fonte CC chaveada de 24V, um Arduino Nano, fornecendo a tensão de 5V, e um multímetro. Os terminais negativos de ambos foram curto-circuitados.

## 4.6 Testes e validação do funcionamento

Após a conclusão do processo de fabricação e montagem da ferramenta, incluindo o circuito eletrônico, foi obtida uma autorização para a realização de testes no laboratório, a fim de validar os resultados obtidos. Os testes foram feitos na presença do Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso para supervisão e orientação quanto ao uso adequado do sistema do manipulador. Foram respeitadas todas as regras de higiene e distanciamento exigidas, como o uso de máscaras e álcool em gel, além de conservar uma distância de 2 metros entre os presentes.

O primeiro passo foi testar o acoplamento da garra no flange do robô, que ocorreu conforme o esperado, como mostra a Figura 4.19.

Em seguida, foram feitas as conexões elétricas dos cabos de sinais e alimentação, ligando a ferramenta à fonte de bancada e à controladora, externos à célula de trabalho, através do chicote. A placa de comunicação desenvolvida foi utilizada como interface entre o módulo de saídas digitais da controladora e o circuito de controle da garra. A alimentação da mesma foi feita pelo módulo X20PS9400, de acordo com a disposição

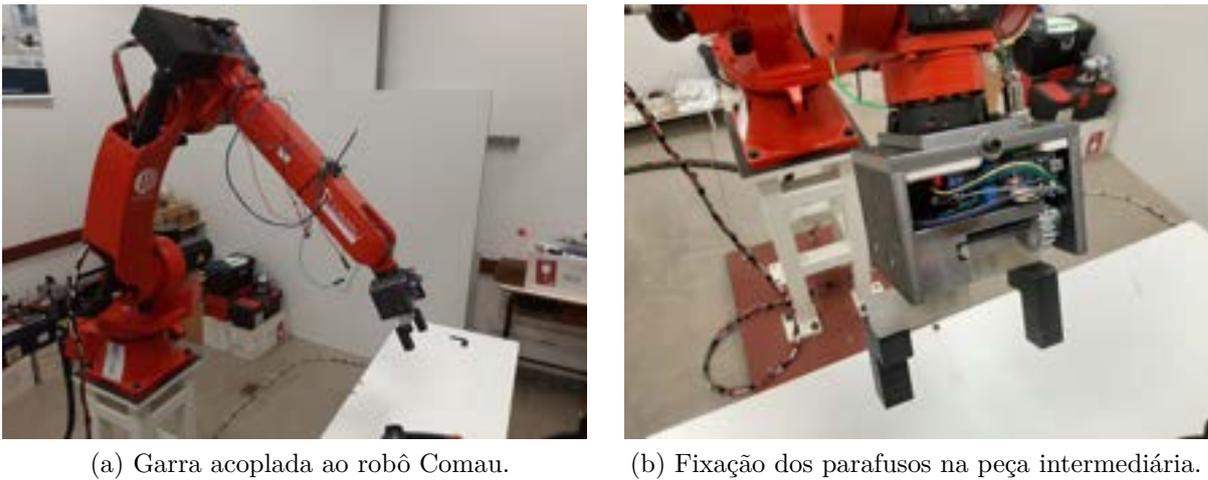


Figura 4.19 – Teste do acoplamento da ferramenta no flange do manipulador industrial.

dos terminais vistos no manual (B&R, 2021b), e por uma fonte de bancada. O terminal negativo de todos os circuitos foi curto-circuitado.

Neste ponto, foi verificado o funcionamento da comunicação entre as partes, através dos algoritmos representados pelos diagramas 4.20 e 4.21.

O primeiro utiliza a linguagem PDL2, e foi desenvolvido no *software* WinC5G e implementado no robô através do TP. Sua função é identificar se um dos botões virtuais do terminal de programação estão sendo pressionados, e caso estiverem, acionar a respectiva saída digital.

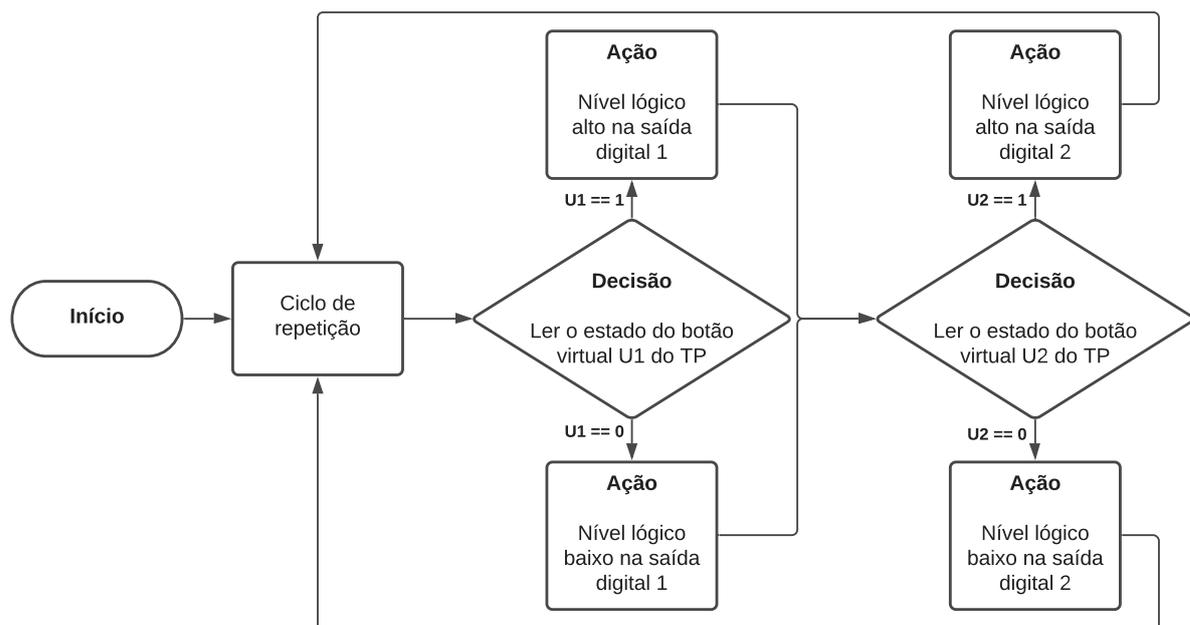


Figura 4.20 – Algoritmo para o controle das saídas digitais da controladora com base nos botões virtuais do TP.

O segundo é uma versão inicial do algoritmo de acionamento, desenvolvido na IDE Arduino, que seleciona entre os comandos de abertura e fechamento da garra pela leitura de 2 sinais digitais. Essas funções foram realizadas simplesmente pelo acionamento do motor nos 2 sentidos, com uma potência fixa de 50%, de acordo com o sinal recebido. Os cubos utilizados são indeformáveis, leves e feitos de ABS, não exigindo uma força de prensão específica para manipulá-los.

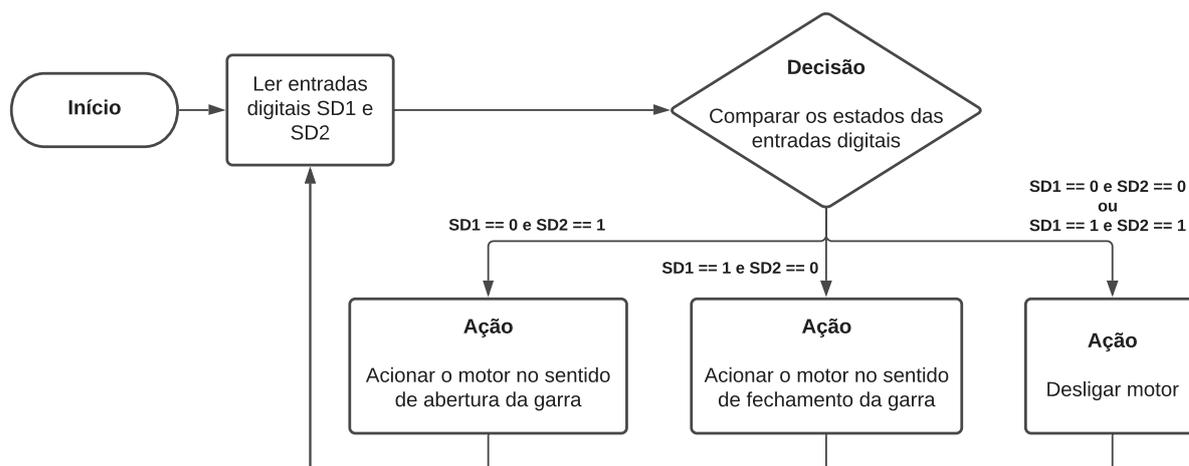


Figura 4.21 – Algoritmo da garra para o reconhecimento de instruções através das entradas digitais.

Pelo teste, pôde ser verificada a operação adequada do sistema de comunicação, com a garra respondendo aos comandos dados através do TP. Depois disso, foi estruturada uma tarefa de empilhamento de 2 cubos, para serem alinhados conforme suas faces. Para isso, cada cubo foi posicionado em uma mesa, como mostra a Figura 4.22.

Foram feitas marcações para fixar as condições iniciais do teste e, em seguida, o robô foi movimentado manualmente através de comandos do TP, de forma a armazenar suas configurações em pontos de referência do espaço de trabalho, como mostra a Figura 4.23. Estas incluem a pose inicial em *home*, as posições e orientações iniciais dos cubos e do ponto objetivo, além dos pontos intermediários necessários para a manipulação. Em seguida, foram elaborados e testados os códigos para a realização dessa tarefa, que consistem, em suma, em uma sequência de movimentos do robô e da ferramenta e em uma lista de configurações previamente armazenadas. Estes estão disponíveis no seguinte repositório do GitHub: [github.com/AlyAurelio/TCC-Complementos](https://github.com/AlyAurelio/TCC-Complementos).



Figura 4.22 – Estruturação da tarefa de manipulação para o teste.

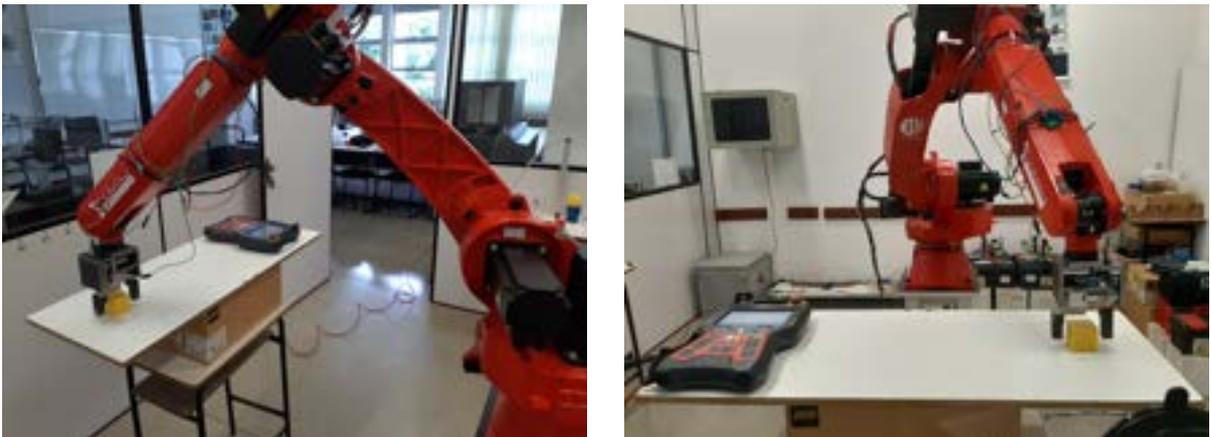


Figura 4.23 – Registro manual das configurações do manipulador para a realização do teste.

Posteriormente, foram desenvolvidos e testados os algoritmos de controle em malha aberta descritos na seção seguinte, considerando as informações e limitações da implementação, observadas durante os testes.

## 4.7 Programação

### 4.7.1 Desenvolvimento do software de acionamento

#### Funções Básicas do Hardware

O principal elemento do circuito de controle da ferramenta é o *encoder*. Ele possibilita a leitura da posição, da velocidade e do sentido do movimento do motor, através de uma contagem de pulsos de dois canais em quadratura (ou seja, defasados em  $90^\circ$ ). Esses pulsos são detectados pelo Arduino por meio de interrupções, garantindo que não ocorrerão perdas na contagem.

O acionamento do motor é feito por uma função que usa como parâmetro um valor inteiro, representando um percentual. Esta consiste em uma aproximação linear considerando a zona morta do motor. Sendo assim, em 0% o motor é desligado, em 1% é fornecida a tensão mínima de operação e em 100% a tensão máxima, para ambos os sentidos de rotação.

A leitura da corrente, feita pelo sensor ACS712, consiste na média de 1000 cálculos realizados com base na relação entre a sensibilidade do sensor e a leitura analógica do sinal, subtraída de um ruído aproximadamente constante. Este foi identificado empiricamente, para este circuito, como  $0,26A$ . Considerando isso, tem-se uma leitura de  $0A$  quando o motor está desligado.

#### Controle de Posição em Malha Aberta

Utilizando como base o passo de  $8mm$  dos fusos, além do número de pulsos do *encoder* por revolução do eixo do motor, e considerando a razão do engrenamento como 1, foi desenvolvida uma rotina para controlar em malha aberta a posição dos dedos da garra, e consequentemente sua abertura.

A sequência de instruções ocorre da seguinte maneira:

1. Verificar a abertura atual.
2. Calcular o número de pulsos que precisa ser contado para que ocorra o deslocamento desejado.

3. Acionar o motor na velocidade máxima, de forma a reduzir o tempo necessário ao deslocamento.
4. Reduzir a velocidade até 20%, através de uma rampa decrescente na entrada, a partir do momento em que forem contados 80% dos pulsos necessários.
5. Desligar o motor quando o número de pulsos registrados for igual ao de referência.

A redução da velocidade é feita para reduzir o excesso de deslocamento que ocorre devido à inércia do motor, que não para imediatamente após a instrução de seu desligamento. A cada 20ms é feita uma verificação, para caso a velocidade do motor se mantiver em zero durante esse período, significa que ocorreu o travamento do motor antes da conclusão do deslocamento, indicando um erro. Isso é feito sem o uso de funções *delay*, evitando o atraso da parada do motor no ponto adequado e também o aquecimento do mesmo em caso de travamento.

Ao final da execução, o registro da abertura atual é atualizado e o erro de posição é armazenado. Este é utilizado na próxima vez que a função for chamada, de forma a reduzir os efeitos do acúmulo de erro ao longo do tempo. A Figura 4.24 mostra um fluxograma que representa o processo de forma simplificada.

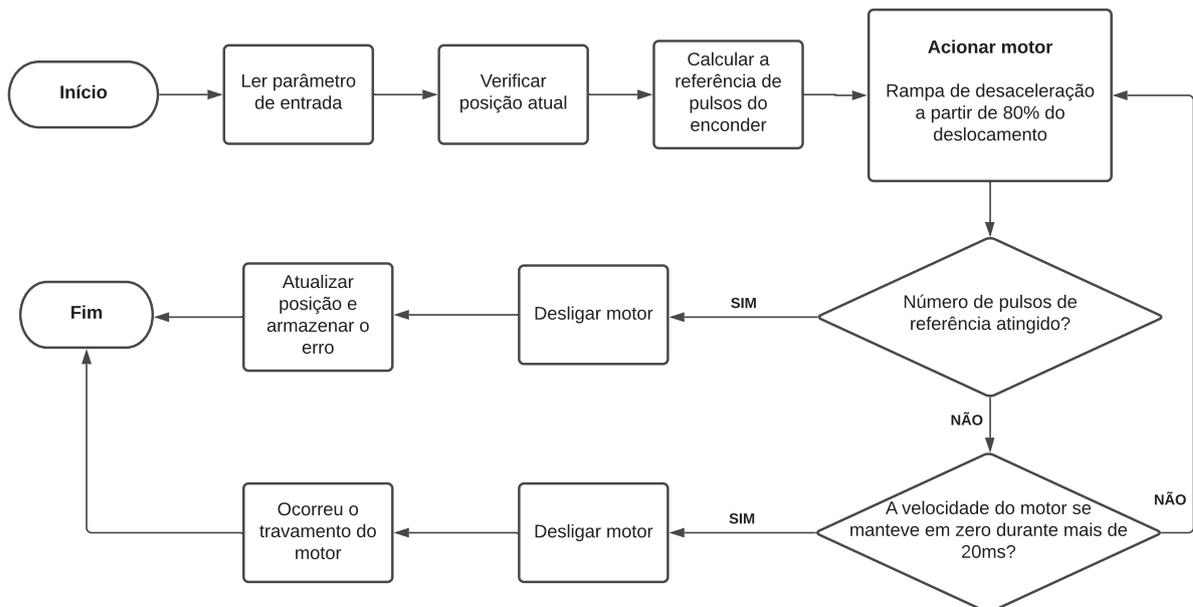


Figura 4.24 – Sequência de instruções do algoritmo de controle em malha aberta de posição.

Essa função foi implementada de forma que a o parâmetro de entrada seja interpretado como uma referência absoluta, logo o deslocamento é feito para essa nova posição, independentemente da abertura atual.

Essa função foi implementada e testada, tendo como instrumento de medição para comparação um paquímetro digital, com resolução de 0,1mm. As referências de entrada foram passadas através da comunicação serial do Arduino. Foi utilizada uma fonte de 12V e 5A chaveada.

### **Controle de Força de Prensão em Malha Aberta**

Devido ao atrito elevado no mecanismo, foi obtida a condição de autobloqueio do fuso. Além disso, considerando a alta zona morta do motor, devido à essa condição, em malha aberta, é inviável controlar a força de prensão após o contato do objeto com os dedos da garra. Sendo assim, foi definida uma lógica diferente:

1. Posicionar os dedos em uma abertura superior ao comprimento do objeto a ser manipulado em 20mm. Logo, feito dessa maneira, o controle de força vale para objetos de 80mm de comprimento ou menores.
2. Iniciar o motor na potência máxima, para vencer o atrito e a inércia.
3. Reduzir a potência, através de uma rampa decrescente na entrada, até um limiar de referência.
4. Manter a potência constante até o travamento do motor pelo contato dos dedos com o objeto.

Dessa forma, considerando que o atrito dinâmico é menor que o estático, é possível obter velocidades inferiores à zona morta, permitindo uma faixa de força de prensão maior como saída. O travamento é detectado quando o número de pulsos fornecidos pelo *encoder* se mantém em zero durante um período de tempo de 20ms. Ao final da execução, o registro da abertura atual é atualizado com base no número de pulsos somados até o travamento. A Figura 4.25 mostra um fluxograma que representa o processo de forma simplificada.

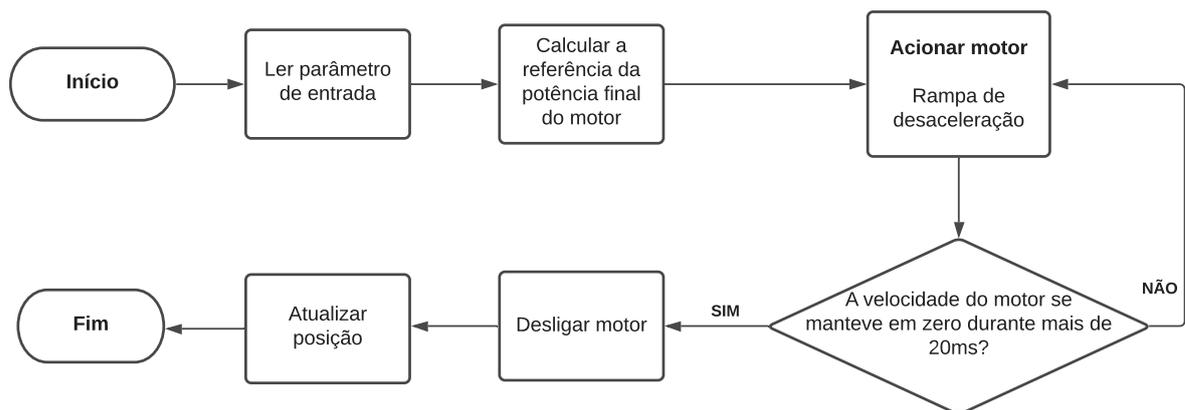


Figura 4.25 – Sequência de instruções do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão.

Essa função foi implementada e testada, tendo como instrumento de medição para comparação o sensor de carga de uma balança digital com capacidade de  $10\text{kg}$ . A Figura 4.26 mostra a disposição dos componentes durante o teste.

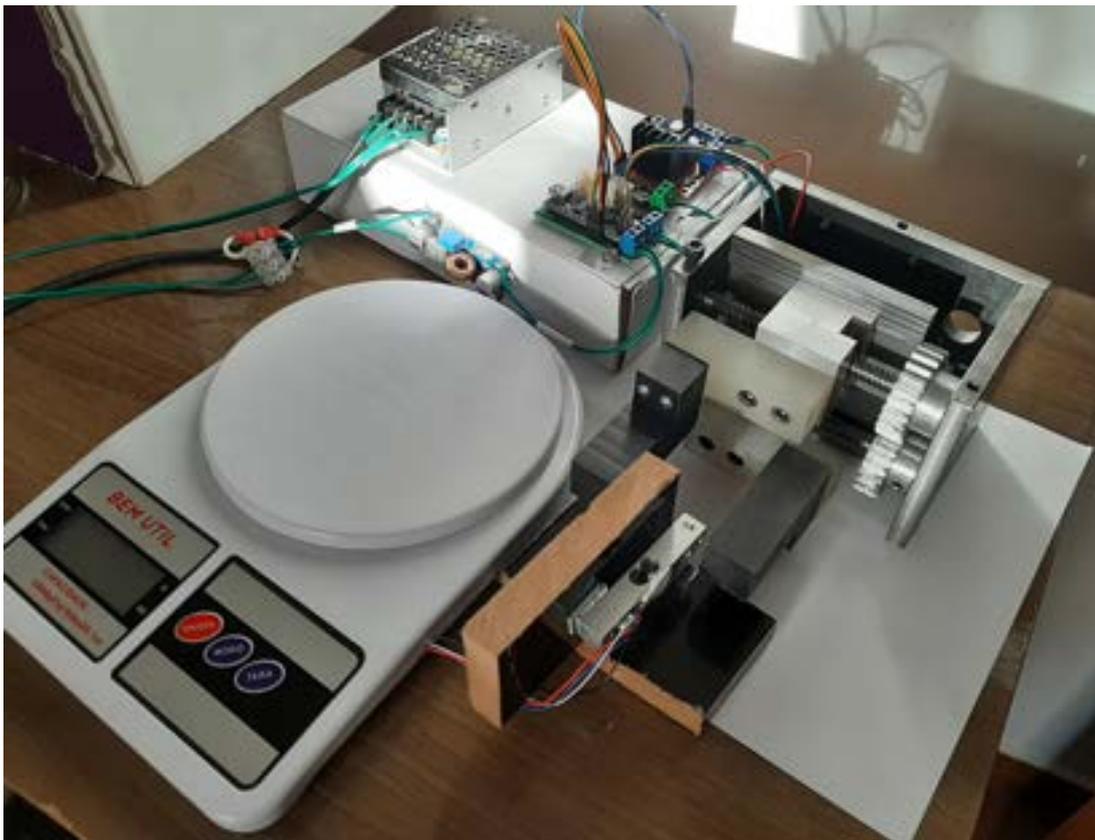


Figura 4.26 – Teste de bancada do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão.

## Protocolo de Comunicação

Com base nos testes em laboratório, foi verificada a disponibilidade de duas saídas digitais corretamente configuradas na controladora. O algoritmo geral foi feito com base nessa informação. Para que as funções sejam usadas normalmente, foi criado um protocolo simples de comunicação via dois fios, um para sinalizar o envio de um novo *bit* (SD1) e outro com o valor desse *bit* (SD2). O objetivo é construir um número binário, a ser interpretado pelo circuito de controle, que indique a instrução e a referência desejadas. Para evitar a execução inesperada das funções, foi adicionado um resistor *pull-down* na entrada digital SD1 do Arduino.

A frequência do envio dos dados foi utilizada como  $40Hz$  (1 *bit* a cada  $25ms$ ). Foi definido o uso de 10 *bits* para transferir uma instrução completa, resultando em um tempo de processamento de  $250ms$ . A Tabela 4.4 mostra o significado de cada *bit* transmitido, em ordem.

Tabela 4.4 – Informação representada por cada *bit* na sequência de uma instrução.

<i>Bit</i>	Informação
1	0 para controlar força e 1 para controlar posição
2	0 para utilizar a referência padrão, 1 para definir uma nova
3 a 9	Número binário de 7 <i>bits</i> representando uma referência de 0 a 100%
10	<i>Bit</i> de verificação, sempre 0

Cada *bit* é lido após o nível lógico de SN1 mudar, com um limite de tempo de espera de  $1s$  entre cada *bit*. A operação é cancelada caso esse limite for excedido uma vez. A Figura 4.27 mostra um fluxograma que representa o algoritmo final de acionamento, de forma simplificada.

A porta digital D11 (SD3) do Arduino foi utilizada como saída, para sinalizar com um nível lógico alto se o sistema estiver ocupado com a realização de uma instrução. Para o teste desse algoritmo, foi utilizado um Arduino externo para gerar as sequências de *bits*. Para isso, foi implementada uma função, com base na sequência da Tabela 4.4. Essa mesma função foi implementada em PDL2, para uso posterior junto ao manipulador. Ambas se encontram disponíveis no mesmo repositório do GitHub apresentado anteriormente.

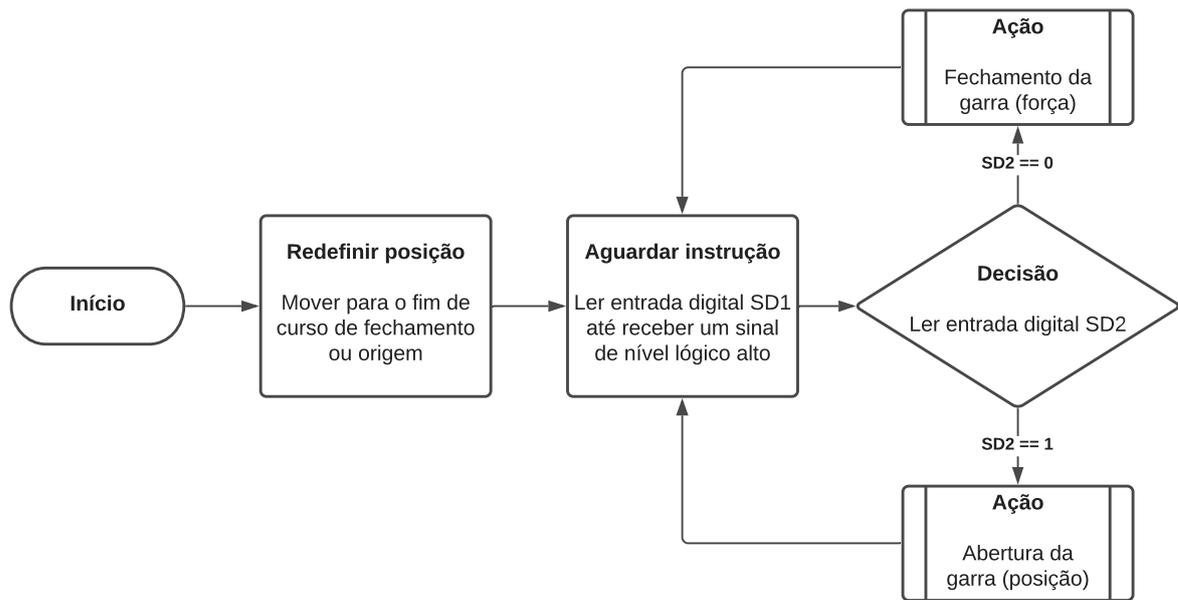


Figura 4.27 – Sequência geral de instruções do algoritmo da ferramenta.

## 4.8 Listagem de componentes e custos

As Tabelas B.1 e B.2, apresentadas no Apêndice B, organizam a lista de peças mecânicas da ferramenta, com os respectivos materiais e processos de fabricação utilizados para a montagem. As Tabelas B.3 e B.4 organizam listas detalhadas dos componentes utilizados, além dos custos do projeto. O custo de entrega dos materiais e componentes, além das taxas de fabricação das peças, não foram considerados nesse documento.

## Resultados e Discussões

Este capítulo organiza e apresenta os resultados obtidos durante a realização das tarefas abordadas na metodologia desse trabalho. Eles foram subdivididos entre resultados do projeto mecânico, da fabricação e montagem, dos testes presenciais, da produção dos circuitos eletrônicos e do desenvolvimento e validação dos algoritmos.

### 5.1 Mecânica

#### 5.1.1 Projeto e construção da ferramenta

##### Projeto mecânico

Com base nas definições e cálculos de dimensionamento realizados no capítulo anterior, foi feita a modelagem 3D das peças, para permitir a verificação da correta interação entre as mesmas. A Figura 5.1 mostra o resultado esperado da fabricação e montagem da ferramenta desenvolvida. Um primeiro detalhe a ser observado é que a estrutura dos dedos pode ser substituída, para a utilização da garra em aplicações específicas que demandem mais que duas superfícies paralelas de contato.

A estrutura obtida é compacta, como foi especificado, e desmontável. Exemplificando de forma simples, montada conforme a figura, ela ocupa uma caixa de 143x102x173mm, inclusive na posição da abertura máxima de 100mm. A parede branca à esquerda na imagem foi adicionada para resolver o problema mostrado na Figura 5.2, pois a estrutura projetada não é simétrica em relação ao plano de contato dos dedos, quando totalmente fechados.

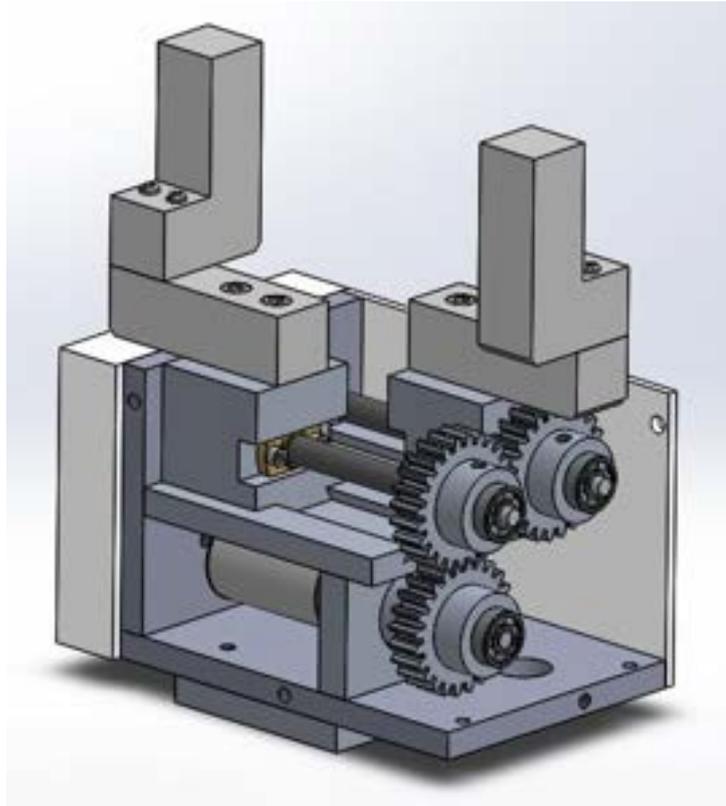


Figura 5.1 – Modelo 3D da montagem mecânica do sistema da garra.

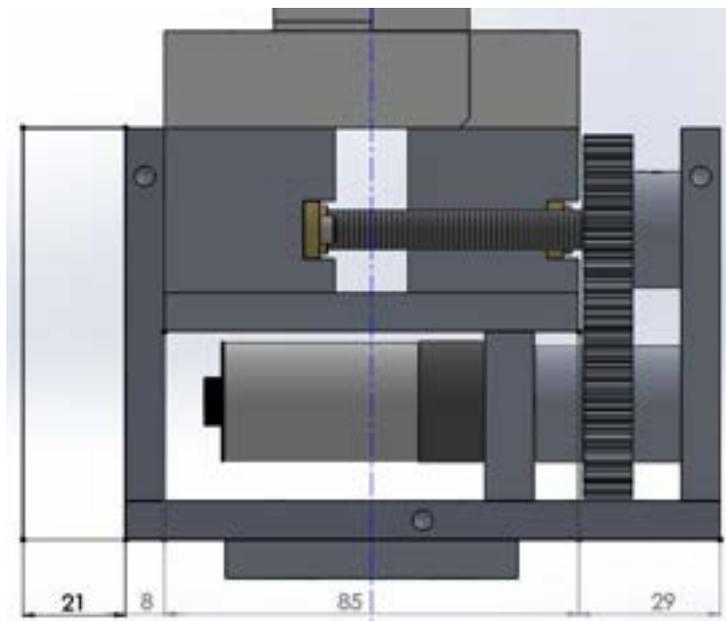


Figura 5.2 – Vista frontal da ferramenta, indicando a assimetria da estrutura em relação ao TCP.

Outro ponto importante é que a espessura das paredes externas foi definida a partir das dimensões dos rolamentos e dos parafusos de fixação escolhidos. Para o presente trabalho, por requisito, a fabricação das mesmas foi feita com a geometria mais simples possível. Devido a isso, a estrutura se encontra superdimensionada e pode ser otimizada para a redução do peso total.

As folhas de detalhamento dispostas Apêndice A, e as listas de componentes e processos de fabricação do Apêndice B, são os principais resultados do projeto mecânico, pois permitem a reprodução da construção feita neste trabalho.

### Fabricação e Construção

Foi realizada a montagem da estrutura, com as peças fabricadas conforme a descrição da Seção 4.4. O resultado obtido é apresentado pelas Figuras 5.3 e 5.4.



Figura 5.3 – Resultado da fabricação e construção da parte mecânica.

Pela comparação mostrada na Figura 5.4, pode-se ver que a estrutura obtida corresponde adequadamente às características projetadas. Foi adicionada às superfícies de contato dos dedos uma fita antiderrapante, para aumentar o atrito com o objeto durante a manipulação. Apesar da diferença de cor, as peças dos dedos são todas de Nylon, conforme especificado.

A principal diferença em relação ao projeto foi a utilização de chapas de aço reaproveitadas para a fabricação das paredes externas e da guia linear. Isso permitiu a redução do custo de material e o aumento da resistência final, resultando em uma estrutura muito robusta, porém de peso elevado. Como mostra a Figura 5.5, incluindo todas as peças, o

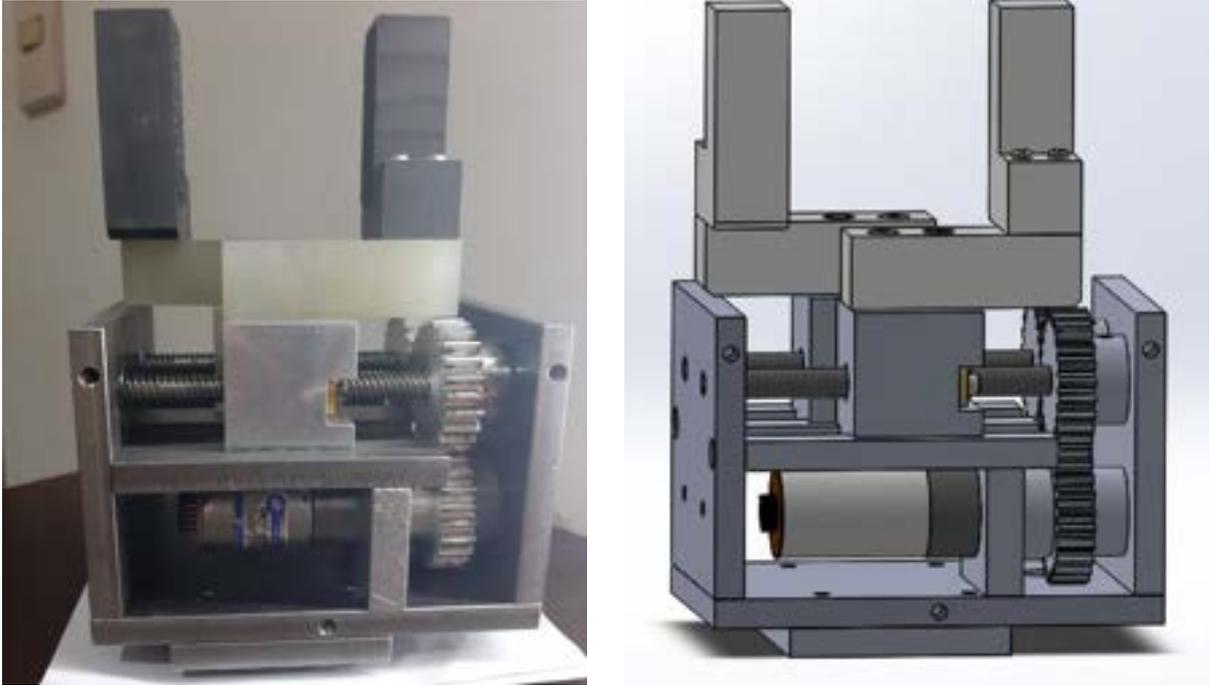


Figura 5.4 – Comparação da montagem mecânica com o modelo 3D produzido.

peso final da ferramenta é de aproximadamente 3kg. Apesar de não ser um problema em relação ao limite de carga do manipulador industrial, a redução desse peso é desejável, seja pela otimização das peças ou pela fabricação de novas em alumínio. Vale destacar também a necessidade de manter a lubrificação das superfícies metálicas em contato.

Como pode ser visto na Figura 5.5, as paredes de simetria e para o fechamento da estrutura também foram fabricadas. Elas foram feitas em madeira, ao invés do ABS previsto em projeto, devido à maior facilidade de obtenção do material nas condições atuais de pandemia. Foram adicionados furos nas paredes externas para a fixação dessas peças. As Figuras 5.6 e 5.7 mostram o resultado final da construção da ferramenta.



Figura 5.5 – Peso da ferramenta completa medido por uma balança digital.

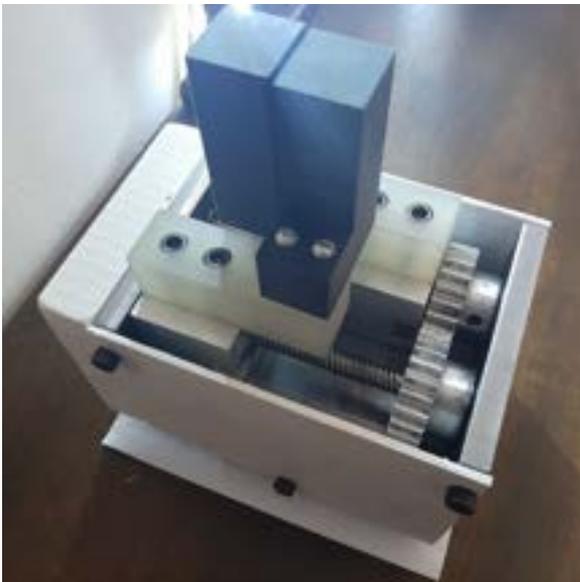


Figura 5.6 – Vistas superior e inferior da montagem da garra.

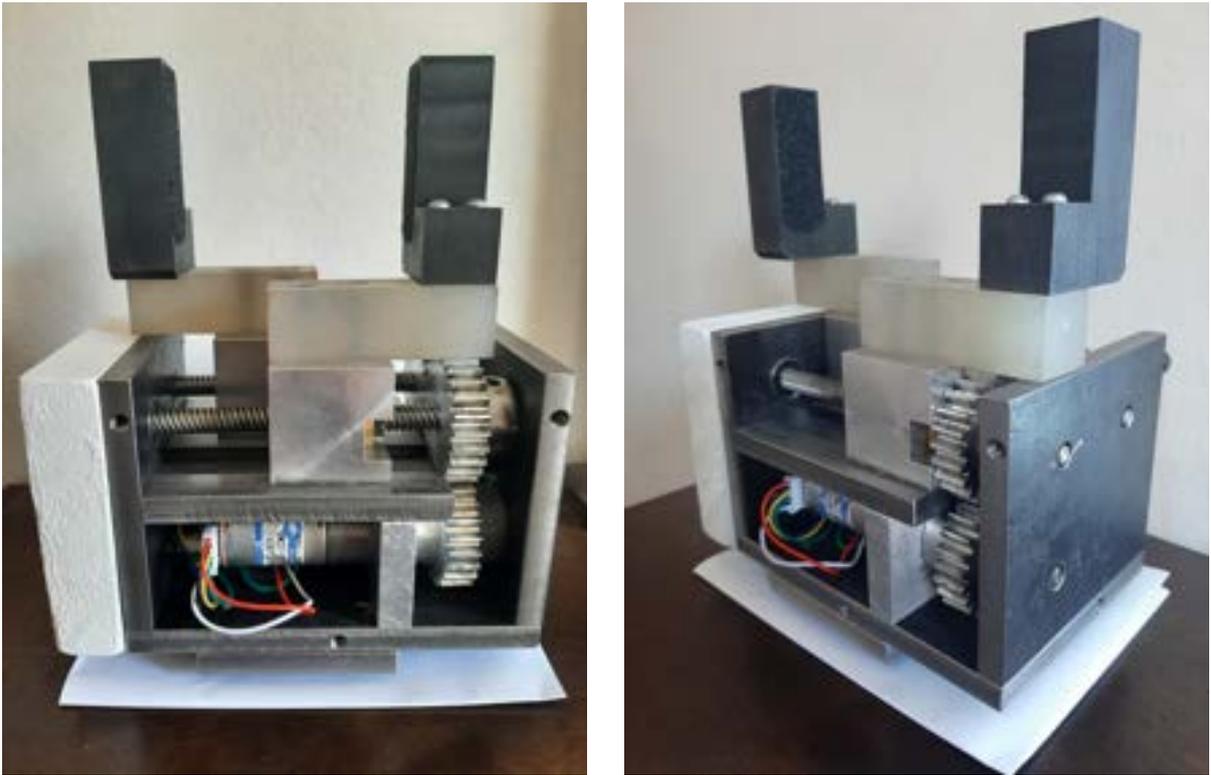


Figura 5.7 – Resultado final da montagem da garra, com a estrutura aberta.

## 5.2 Testes e validação em laboratório

Seguindo as etapas do desenvolvimento, inicialmente, foi feito o teste de resposta da garra a partir de comandos enviados pela controladora, por meio dos botões virtuais do TP, como mostra a Figura 5.8.

O teste foi bem sucedido, comprovando o funcionamento adequado do mecanismo e da função em PDL2 que solicita o acionamento da ferramenta, através das portas digitais. Em seguida, foi organizada a estrutura da célula de trabalho, posicionando e configurando a garra e o manipulador, além das mesas e dos cubos. Depois disso, foi executado o programa com a sequência de instruções para a tarefa estruturada escolhida. Assim, foi realizado o empilhamento dos dois cubos, de acordo com o esperado, conforme mostra a Figura 5.9.



Figura 5.8 – Teste manual da comunicação entre a controladora e a garra.



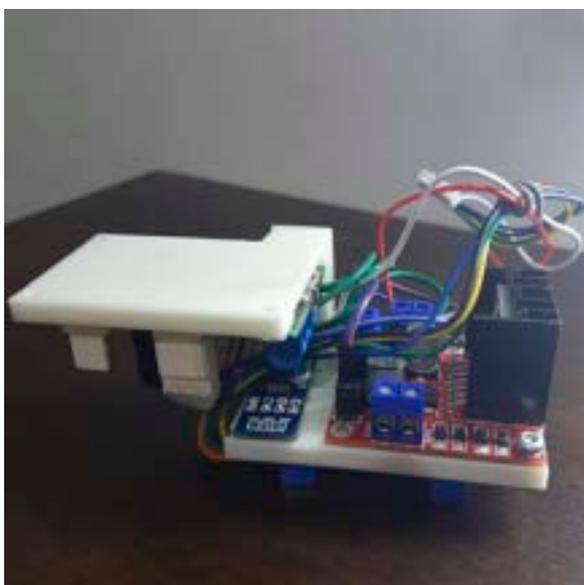
Figura 5.9 – Teste da ferramenta por uma tarefa estruturada de empilhamento de dois cubos.

Apesar das irregularidades dos próprios cubos, o empilhamento foi feito com uma elevada precisão de posição e orientação, indicando a adequação dos sistemas para a futura implementação da tarefa completa.

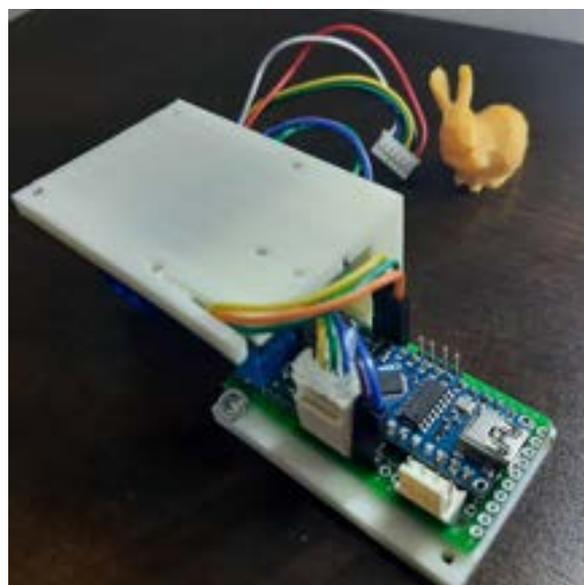
## 5.3 Eletrônica

### 5.3.1 Circuito de controle

Foi obtido um circuito eletrônico desmontável, de forma a facilitar manutenções. Para ter acesso aos componentes internos é necessário abrir a lateral e desconectar os cabos de alimentação e do motor. A Figura 5.10 mostra a disposição dos componentes no suporte de fixação desenvolvido. Já a Figura 5.11 mostra o circuito inserido na estrutura da ferramenta.



(a) Módulo de ponte H e sensor de corrente.



(b) Arduino e conectores.

Figura 5.10 – Montagem dos componentes do circuito de controle no suporte desenvolvido.

Os terminais referentes aos sinais de entrada do módulo de ponte H, assim como os canais de saída, foram curto-circuitados através de *jumpers*, da forma sugerida no *datasheet*. Com os canais em paralelo, foi possível trabalhar com a faixa completa de potência do motor. Em caso de uso prolongado da ferramenta, a dissipação de calor é feita através de toda a estrutura externa, pelo contato do dissipador deste módulo com a parede lateral.

A alimentação e os sinais são recebidos pelos terminais de um conector fêmea do tipo Mike, que permanece fixo na base inferior. O macho deste é fixado através de uma peça móvel com rosca, evitando que os cabos se soltem. O regulador de tensão trabalha externamente à estrutura da ferramenta, junto à placa de comunicação. Ele consiste em

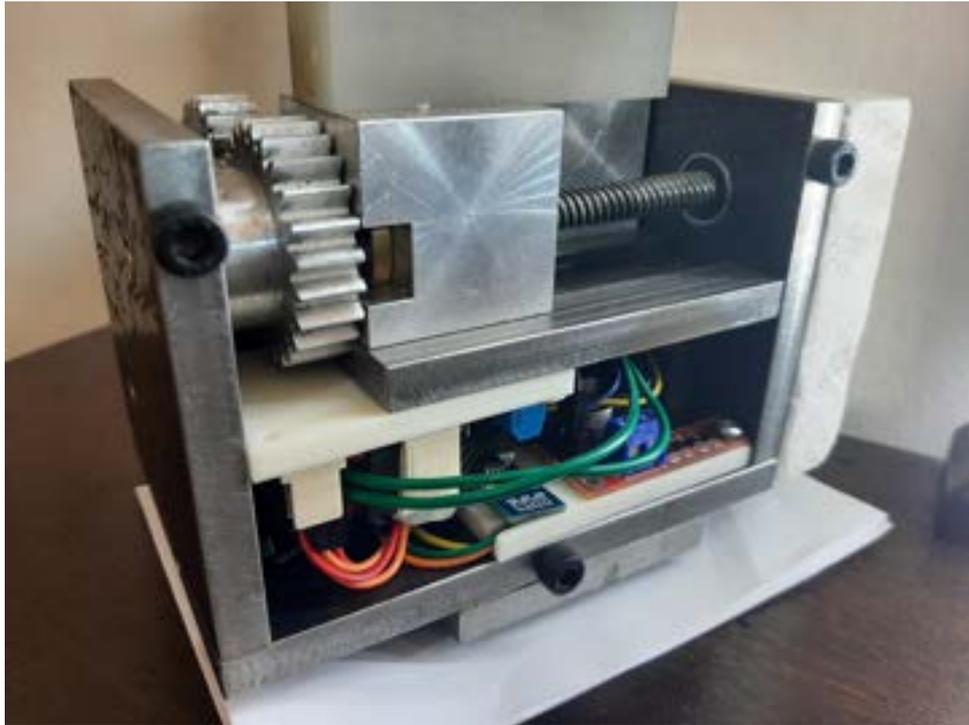


Figura 5.11 – Circuito interno de controle posicionado na estrutura da ferramenta.

um componente opcional, pois a alimentação pode ser fornecida diretamente por uma fonte externa de tensão regulável.

### 5.3.2 Placa de comunicação

Após a montagem do circuito, soldagem dos componentes e a realização de testes de continuidade nas trilhas, foi obtida a placa de comunicação mostrada na Figura 5.12. Como detalhado na Seção 4.5, foram realizados testes de bancada para verificar o funcionamento de todos os canais de conversão, nos dois sentidos da interface entre o Arduino e a controladora C5G. Com isso, foi obtida a Tabela 5.1.

Como visto em Silva (2019), pelo estudo dos manuais do Arduino e do módulo de entradas digitais da controladora, tem-se que, para o primeiro, um sinal de tensão inferior a 1,5V é considerado nível lógico baixo, e acima de 3V representa um nível alto. Já o segundo reconhece tensões inferiores a 5V e superiores a 15V como níveis lógicos baixo e alto, respectivamente. Pela Tabela 5.1, tem-se que a operação da placa de comunicação ocorre de forma adequada à aplicação, nos dois sentidos de conversão.

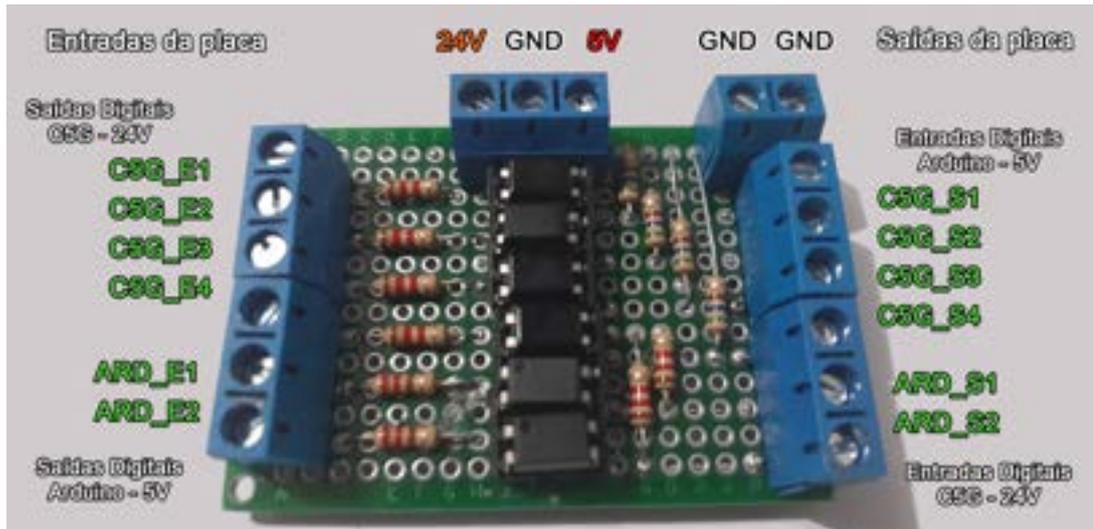


Figura 5.12 – Placa de conversão de nível lógico por fotoacoplador produzida.

Tabela 5.1 – Resultado dos testes de bancada da placa de conversão de nível lógico isolado por fotoacoplador produzida.

Canal	Entrada	Tensão aplicada na entrada (V)	Tensão aferida na saída (V)	Saída
Sentido <i>Arduino</i> → <i>C5G</i>				
1	C5G_ E1	23,9	4,9	C5G_ S1
2	C5G_ E2	23,8	4,9	C5G_ S2
3	C5G_ E3	23,8	4,9	C5G_ S3
4	C5G_ E4	23,8	4,9	C5G_ S4
1	C5G_ E1	0	0,1	C5G_ S1
2	C5G_ E2	0	0,1	C5G_ S2
3	C5G_ E3	0	0,1	C5G_ S3
4	C5G_ E4	0	0,1	C5G_ S4
Sentido <i>C5G</i> → <i>Arduino</i>				
5	ARD_ E1	4,8	23,4	ARD_ S1
6	ARD_ E2	4,8	23,5	ARD_ S2
5	ARD_ E1	0	0,1	ARD_ S1
6	ARD_ E2	0	0,1	ARD_ S2

## 5.4 Programação

### 5.4.1 Testes do controle de força de prensão em malha aberta

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.7.1, foram feitos testes de bancada para a calibração da função de controle de força. Através da variação do sinal de entrada, foram

aferidos a corrente do motor e a força de prensão exercida. Foram feitos cinco testes para cada referência, de forma a possibilitar o tratamento estatístico mínimo. Foi aferida como 30mm a espessura da estrutura do sensor utilizado. Assim, a abertura inicial de cada teste foi definida como 50mm. As Tabelas 5.2 e 5.3 organizam os resultados obtidos.

Tabela 5.2 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão, para a corrente do motor.

Referência		Corrente aferida pelo sensor ACS712 (A)						
%	PWM	T1	T2	T3	T4	T5	Média	Desvio Padrão
1	141	1,53	1,48	1,48	1,46	1,46	1,48	0,03
5	145	1,54	1,84	1,54	1,52	1,51	1,59	0,14
10	151	1,63	1,61	1,9	1,61	1,6	1,67	0,13
20	163	2,13	1,91	1,79	1,77	1,78	1,88	0,15
30	174	1,98	1,95	1,95	2,35	1,94	2,03	0,18
40	186	2,16	2,4	2,12	2,11	2,11	2,18	0,12
50	197	2,31	2,27	2,27	2,27	2,7	2,36	0,19
60	209	2,47	2,87	2,44	2,44	2,42	2,53	0,19
70	220	2,64	2,6	2,59	2,57	3,12	2,70	0,23
80	232	2,8	2,74	2,75	2,74	2,74	2,75	0,03
90	243	2,95	2,89	2,88	3,17	2,88	2,95	0,12
100	255	3,11	3,04	3,05	3,07	3,07	3,07	0,03

Tabela 5.3 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta da força de prensão, para a força em si.

Referência		Força aferida pelo sensor de carga (kgf)						
%	PWM	T1	T2	T3	T4	T5	Média	Desvio Padrão
1	141	0,95	0,83	0,98	1,42	1,38	0,92	0,30
5	145	1,22	1,12	1,28	1,52	1,47	1,32	0,17
10	151	1,38	1,45	1,48	1,63	1,55	1,50	0,10
20	163	1,67	1,78	1,79	1,93	2,01	1,84	0,13
30	174	1,96	2,01	2,12	2,74	2,58	2,28	0,35
40	186	2,68	2,73	2,95	3,35	3,52	3,05	0,37
50	197	3,25	3,52	3,55	3,73	3,68	3,55	0,19
60	209	3,78	3,72	3,78	4,11	4,03	3,88	0,17
70	220	4,15	3,97	4,03	4,63	4,35	4,23	0,27
80	232	4,45	4,85	4,88	4,85	4,93	4,79	0,19
90	243	4,83	5,06	5,14	5,12	5,08	5,05	0,12
100	255	5,15	5,33	5,34	5,44	5,33	5,32	0,10

O resultado da Tabela 5.3 indica que o uso da ferramenta para a manipulação de objetos facilmente deformáveis, como por exemplo um cubo de papel, não é recomendada. Por outro lado, a Figura 5.13 mostra um teste realizado para mostrar a confiabilidade do controle de força. Assim, tem-se que é possível segurar um ovo sem quebrá-lo.

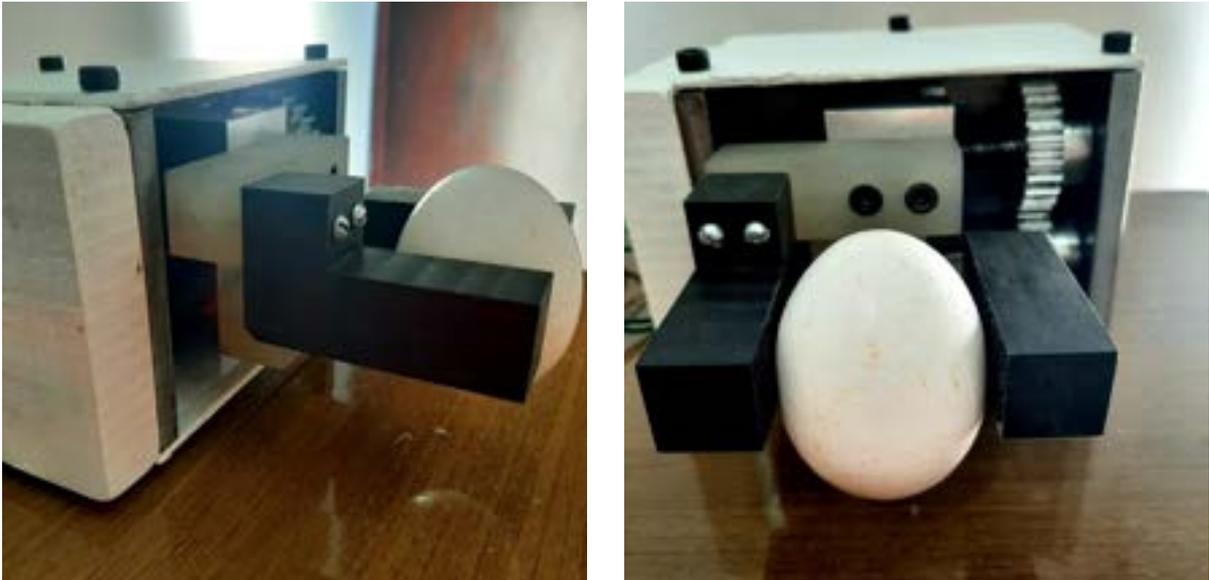


Figura 5.13 – Experimento de manipulação de um ovo utilizando a ferramenta desenvolvida.

Para facilitar a análise do comportamento do sistema, foi plotado o gráfico da Figura 5.14. Através dos dados experimentais e da biblioteca *SciPy* 1.6.1, foi feito um ajuste das curvas de forma a obter as Equações 5.1 e 5.2:

$$I_m = 0,0159E + 1,5278 \quad (5.1)$$

$$F_p = 0,0452E + 1,0473 \quad (5.2)$$

Em que  $I_m$  representa a corrente do motor,  $F_p$  a força de prensão e  $E$  o sinal de entrada, como um percentual da tensão máxima do motor.

O gráfico mostra que uma equação da reta é uma boa aproximação para relacionar as entradas e as saídas obtidas experimentalmente, tanto em relação à força de prensão quanto à corrente do motor. Com base nesse resultado, pode ser feita uma escolha mais criteriosa da referência para o algoritmo. O sensor de corrente integrado poderá ser

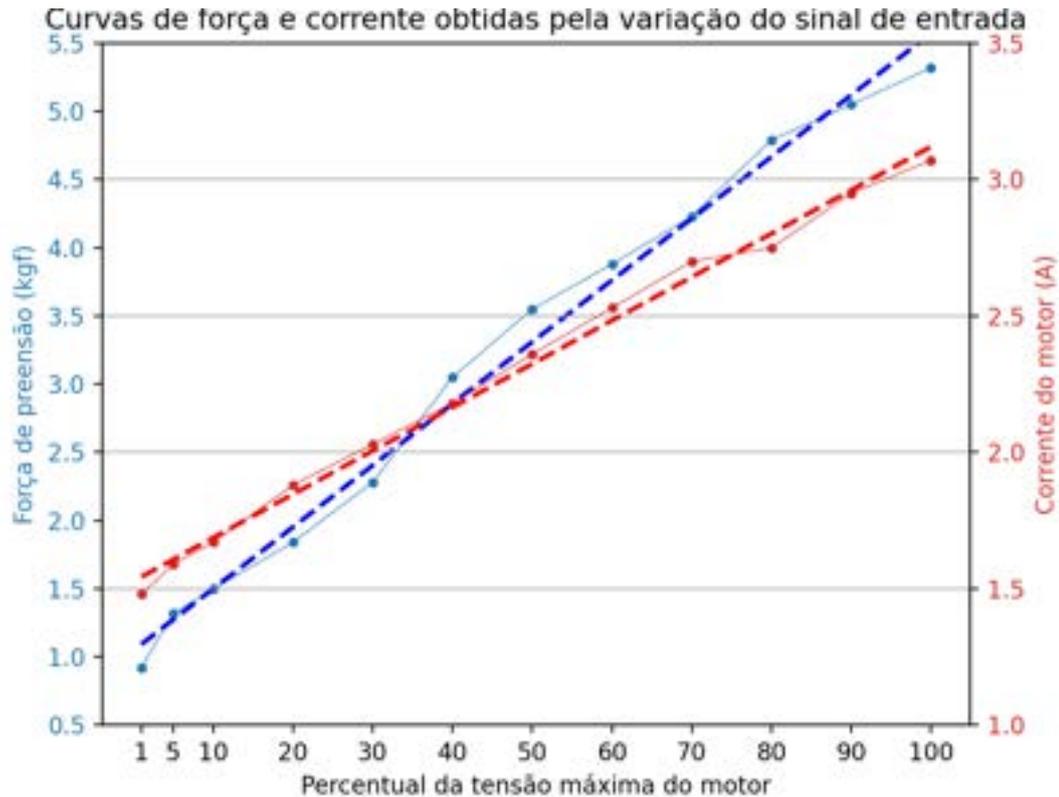


Figura 5.14 – Análise do comportamento da força de prensão e da corrente do motor aferidas com base no sinal de entrada aplicado.

utilizado futuramente para fechar uma malha de controle de força e obter uma maior precisão. Este também pode ser utilizado de forma redundante como condição para as verificações de travamento.

É possível constatar que o modelo matemático utilizado, referente à conversão do torque do motor para a força linear no fuso, representou bem o funcionamento do sistema, pois o mesmo é capaz de exercer a força de  $4,5\text{kgf}$ , que foi estipulada considerando o coeficiente de segurança definido. Levando também em consideração a construção robusta da estrutura e o atrito elevado no contato, tem-se que a carga máxima da garra desenvolvida excede muito os  $0,5\text{kg}$  exigidos pela especificação. Isso aumenta as possibilidades de aplicação envolvendo a ferramenta, limitadas pela carga máxima do manipulador.

#### 5.4.2 Testes do controle de posição em malha aberta

De forma semelhante ao processo descrito na seção anterior, foram feitos testes para verificar o funcionamento do algoritmo de controle de posição. Foram feitas três medições para cada referência, para três tipos diferentes de teste. No primeiro, o ponto de partida

utilizado foi a origem. No segundo, para analisar o acúmulo de erro, foi utilizado como ponto de partida o resultado da referência anterior, em uma sequência crescente. O último segue esta mesma estratégia, porém para uma sequência decrescente. As Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 organizam os resultados obtidos.

Para os três conjuntos de testes, o erro máximo de posicionamento, em relação à média, foi de  $1,1mm$ . Pode-se observar que o erro obtido para referências acima de  $80mm$  tende a ser maior do que para aberturas menores. Neste caso, ele se mostra menor que  $0,5mm$ , indicando um resultado adequado para a aplicação. Tem-se também que o acúmulo de erro influencia minimamente na saída, para ajustes consecutivos de posição. Mesmo assim, este pode ser zerado rapidamente pela redefinição da abertura da garra, movendo-a para a origem ou reiniciando o algoritmo principal.

Durante os testes, foi verificada a presença de pequenas irregularidades provenientes da fabricação e da montagem, pois as folgas existentes entre os blocos de suporte e a guia linear variam ao longo do movimento da garra. Isso exige um torque maior do motor em alguns pontos, sobretudo para aberturas acima de  $80mm$ , porém isso não compromete o funcionamento adequado da ferramenta e suas funções. A Tabela 5.4 lista as especificações técnicas da garra, com base nos resultados obtidos.

Tabela 5.4 – Especificações técnicas da ferramenta desenvolvida.

Característica	Valor
Abertura máxima	$100mm$
Velocidade máxima	$26,7mm/s$
Carga máxima	$3kg$
Corrente máxima	$3,5A$
Força de preensão máxima	$5,3kgf$
Tensão de alimentação direta	$8,1V$
Tensão de alimentação utilizando o regulador	$9 a 36V$
Comunicação	Entradas e saídas digitais

Tabela 5.5 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, com os dedos partindo da origem.

Referência (mm)	T1	T2	T3	Média	Desvio Padrão	Erro
5	5	5	5,1	5,03	0,06	0,03
10	9,8	9,8	9,9	9,83	0,06	-0,17
15	14,5	14,8	14,8	14,70	0,17	-0,3
20	19,6	20,2	20,1	19,97	0,32	-0,03
25	25	24,9	25,4	25,10	0,26	0,1
30	29,7	30,1	29,9	29,90	0,20	-0,1
35	35,1	35,5	35	35,20	0,26	0,2
40	40	40,2	40,5	40,23	0,25	0,23
45	44,9	45,4	45	45,10	0,26	0,1
50	50,3	50,5	50,3	50,37	0,12	0,37
55	55,3	55,4	55,5	55,40	0,10	0,4
60	60,1	60,3	60,4	60,27	0,15	0,27
65	65,5	65,5	65,3	65,43	0,12	0,43
70	70,5	70,5	70,7	70,57	0,12	0,57
75	75,3	75,5	75,4	75,40	0,10	0,4
80	80,9	80,8	80,5	80,73	0,21	0,73
85	85,9	86	85,8	85,90	0,10	0,9
90	90,5	90,7	91	90,73	0,25	0,73
95	95,9	95,7	96	95,87	0,15	0,87
100	100,9	101,1	100,9	100,97	0,12	0,97

Tabela 5.6 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, em um movimento relativo com referência crescente.

Referência (mm)	T1	T2	T3	Média	Desvio Padrão	Erro
5	5	5	4,9	4,97	0,06	-0,03
10	9,9	9,9	9,8	9,87	0,06	-0,13
15	14,9	14,8	14,7	14,80	0,10	-0,2
20	20,1	20,1	19,9	20,03	0,12	0,03
25	25,3	25,2	24,9	25,13	0,21	0,13
30	30,2	29,9	30	30,03	0,15	0,03
35	35,4	35,1	35,3	35,27	0,15	0,27
40	40,4	40,4	40,4	40,40	0,00	0,4
45	45,3	44,9	45,1	45,10	0,20	0,1
50	50,5	50,1	50	50,20	0,26	0,2
55	55,5	55,4	55,4	55,43	0,06	0,43
60	60,5	60,2	60,3	60,33	0,15	0,33
65	65,6	65,2	65,5	65,43	0,21	0,43
70	70,8	70,4	70,5	70,57	0,21	0,57
75	75,7	75,3	75,4	75,47	0,21	0,47
80	80,9	80,3	80,6	80,60	0,30	0,6
85	86	85,8	85,9	85,90	0,10	0,9
90	90,8	90,3	90,6	90,57	0,25	0,57
95	96,1	95,5	95,7	95,77	0,31	0,77
100	101,2	100,7	100,9	100,93	0,25	0,93

Tabela 5.7 – Resultados experimentais do algoritmo de controle em malha aberta de posição, em um movimento relativo com referência decrescente.

Referência (mm)	T1	T2	T3	Média	Desvio Padrão	Erro
100	101,2	100,7	100,9	100,93	0,25	0,93
95	96,2	96	96,1	96,10	0,10	1,1
90	91,2	91	90,9	91,03	0,15	1,03
85	85,7	85,5	85,7	85,63	0,12	0,63
80	80,8	80,2	80,5	80,50	0,30	0,5
75	75,8	75,6	75,4	75,60	0,20	0,6
70	70,4	70	70,1	70,17	0,21	0,17
65	65,5	65,2	65	65,23	0,25	0,23
60	60,5	60,1	60,3	60,30	0,20	0,3
55	55,2	54,8	54,9	54,97	0,21	-0,03
50	50,1	49,9	50,1	50,03	0,12	0,03
45	45,3	44,9	45,1	45,10	0,20	0,1
40	39,9	39,8	39,9	39,87	0,06	-0,13
35	34,9	34,7	34,9	34,83	0,12	-0,17
30	30,1	29,8	30	29,97	0,15	-0,03
25	24,8	24,5	24,6	24,63	0,15	-0,37
20	19,7	19,4	19,6	19,57	0,15	-0,43
15	14,8	14,6	14,6	14,67	0,12	-0,33
10	9,5	9,3	9,4	9,40	0,10	-0,6
5	4,7	4,8	4,6	4,70	0,10	-0,3

## Considerações Finais

Neste capítulo, são descritas as conclusões constatadas durante o desenvolvimento do trabalho, relacionando os objetivos propostos aos resultados obtidos. Em seguida, são apresentadas propostas para futuras sequências do estudo.

### 6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a complementação de uma célula robotizada para tarefas de manipulação, pelo projeto, construção e programação de uma ferramenta do tipo garra de dedos paralelos, compatível com o robô Comau Smart5 Six®. Além disso, o desenvolvimento foi orientado de forma a possibilitar a realização de uma tarefa de empilhamento de cubos descrita em um trabalho anterior.

Na fase de levantamento de referências e construção da fundamentação do trabalho, foram estudados conceitos relacionados à plataforma C5G Open e sistemas de processamento de imagens. Devido à adaptação proposta para o trabalho, em virtude do contexto de isolamento social, esses conceitos foram utilizados indiretamente, de forma a adequar o projeto da ferramenta para sua integração com esses sistemas futuramente. Essa adaptação em relação ao conteúdo foi pertinente, pois permitiu a realização do primeiro módulo da pesquisa de forma detalhada, produzindo um resultado final consistente.

O primeiro resultado alcançado foi o projeto da estrutura mecânica da ferramenta. Foi necessário um extenso estudo teórico para esta realização, além da experiência prévia adquirida com as disciplinas de mecânica e robótica. A partir do modelo 3D produzido, é possível incluir a garra em *softwares* de simulação, para planejar seu uso e sua integração

com o robô, de forma segura e independente do uso do laboratório. Utilizando as folhas de detalhamento elaboradas pode-se reproduzir a montagem, adquirindo os componentes e fabricando as peças necessárias. A fabricação das peças e a montagem da garra ocorreu de forma superior ao previsto no projeto, resultando em um mecanismo funcional, com uma estrutura mais robusta, em detrimento do aumento do peso final.

Os circuitos eletrônicos confeccionados foram testados e validados na prática, comprovando a adequação da especificação dos componentes. A PCI de conversão de nível lógico se mostrou adequada para a aplicação e pode ser utilizada em conjunto de outras ferramentas que se comuniquem com a controladora de forma semelhante. O circuito de controle foi montado de forma a ser acessível para manutenções. Além disso, a adição de melhorias e a realização de modificações são possíveis simplesmente pela alteração do código.

Os algoritmos foram desenvolvidos de forma a explorar as capacidades do hardware e ao mesmo tempo fornecer robustez, pelos tratamentos de exceções e rotinas de segurança, para evitar erros ou danos durante o uso da ferramenta. Apesar dos controles de posição e força de prensão serem feitos em malha aberta, foi comprovado que a precisão de ambos está de acordo com o exigido nas especificações. O protocolo de comunicação utilizado permite o uso da capacidade total da ferramenta, considerando a limitação do número de portas digitais disponíveis na controladora.

Por fim, foram cumpridos todos os objetivos específicos, e foi obtida uma ferramenta versátil, de baixo custo e propósito geral, capaz de atender às especificações definidas e realizar plenamente sua função na tarefa de manipulação escolhida como referência. Assim, pôde ser verificado que a contribuição desse trabalho para a estrutura do laboratório foi significativa, pois foram desenvolvidos recursos que são a base para uma ampla variedade de novos trabalhos e pesquisas futuras.

## 6.2 Propostas de Continuidade

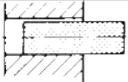
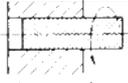
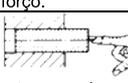
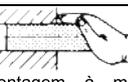
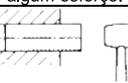
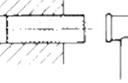
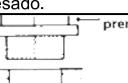
Durante o desenvolvimento deste TCC foram percebidos os seguintes pontos que podem ser sugeridos como continuidade da pesquisa:

- Otimização das peças mecânicas estruturais para a redução do peso da ferramenta.

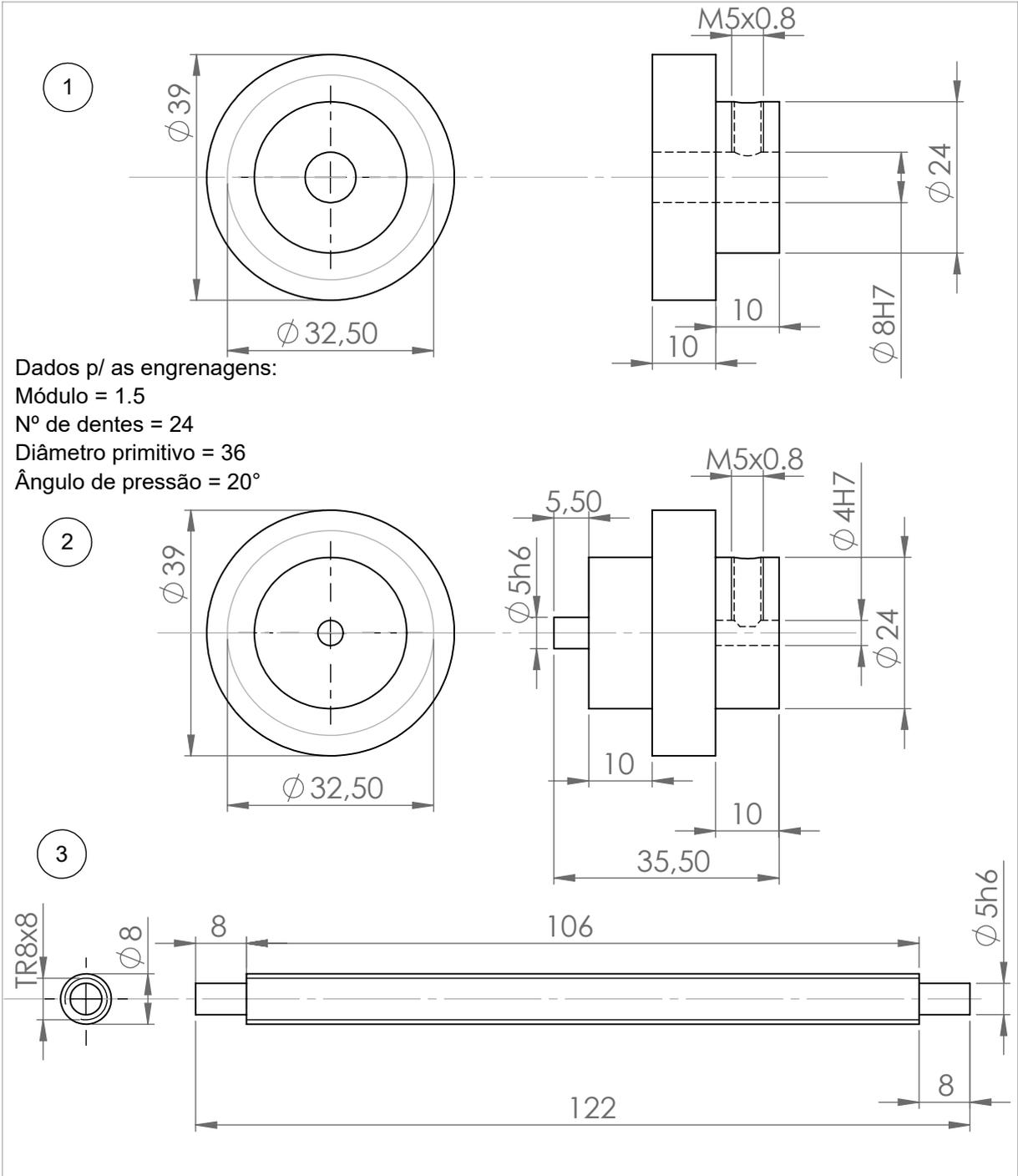
- Modelagem matemática da dinâmica da garra e implementação de uma malha fechada de controle para os sistemas de força e posição.
- Desenvolvimento do sistema de aquisição e processamento de imagens para localizar e identificar a orientação dos cubos no espaço de trabalho.
- Desenvolvimento do algoritmo de controle de movimentação do manipulador, com base na recepção de instruções pelo APC, utilizando a plataforma C5G Open.
- Elaboração de uma estratégia para a integração dos sistemas, de forma a realizar a tarefa completa de empilhamento.

## Folhas de Detalhamento do Projeto

Figura A.1 – Tolerâncias dimensionais recomendadas para aplicações mecânicas diversas.

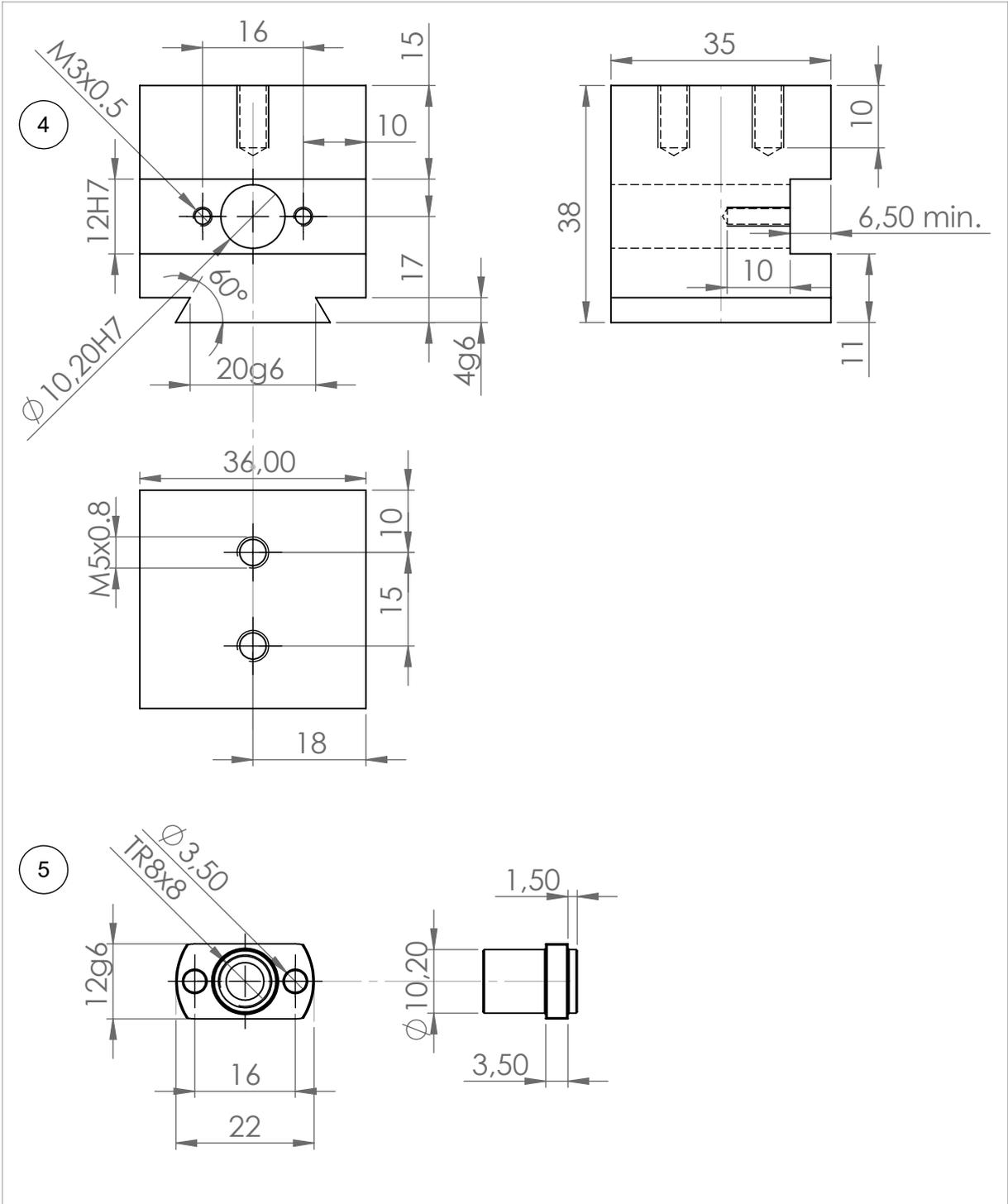
AJUSTES RECOMENDAÇÕES						
TIPO DE AJUSTE	EXEMPLO DE AJUSTE	EXTRA PRECISO	MECÂNICA PRECISA	MECÂNICA MÍDIA	MECÂNICA ORDINÁRIA	EXEMPLO DE APLICAÇÃO
LIVRE	 Montagem à mão, com facilidade.	$H_6 e_7$	$H_7 e_7$ $H_7 e_8$	$H_8 e_9$	$H_{11} a_{11}$	Peças cujos funcionamentos necessitam de folga por força de dilatação, mau alinhamento, etc.
ROTATIVO	 Montagem à mão podendo girar sem esforço.	$H_6 f_6$	$H_7 f_7$	$H_8 f_8$	$H_{10} d_{10}$ $H_{11} d_{11}$	Peças que giram ou deslizam com boa lubrificação. Ex.: eixos, mancais, etc.
DESLIZANTE	 Montagem à mão com leve pressão.	$H_6 g_5$	$H_7 g_6$	$H_8 g_8$ $H_8 h_8$	$H_{10} h_{10}$ $H_{11} h_{11}$	Peças que deslizam ou giram com grande precisão. Ex.: anéis de rolamentos, corrediças, etc.
DESLIZANTE JUSTO	 Montagem à mão, porém, necessitando de algum esforço.	$H_6 h_5$	$H_7 h_6$			Encaixes fixos de precisão, órgãos lubrificados deslocáveis à mão. Ex.: punções, guias, etc.
ADERENTE FORÇADO LEVE	 Montagem com auxílio de martelo.	$H_6 js$	$H_7 j_6$			Órgãos que necessitam de frequentes desmontagens. Ex.: polias, engrenagens, rolamentos, etc.
FORÇADO DURO	 Montagem com auxílio de martelo pesado.	$H_6 m_5$	$H_7 m_6$			Órgãos possíveis de montagens e desmontagens sem deformação das peças.
À PRESSÃO COM ESFORÇO	 Montagem com auxílio de balancim ou por dilatação	$H_6 p_5$	$H_7 p_6$			Peças impossíveis de serem desmontadas sem deformação. Ex.: buchas à pressão, etc.

Fonte: SENAI (1996).

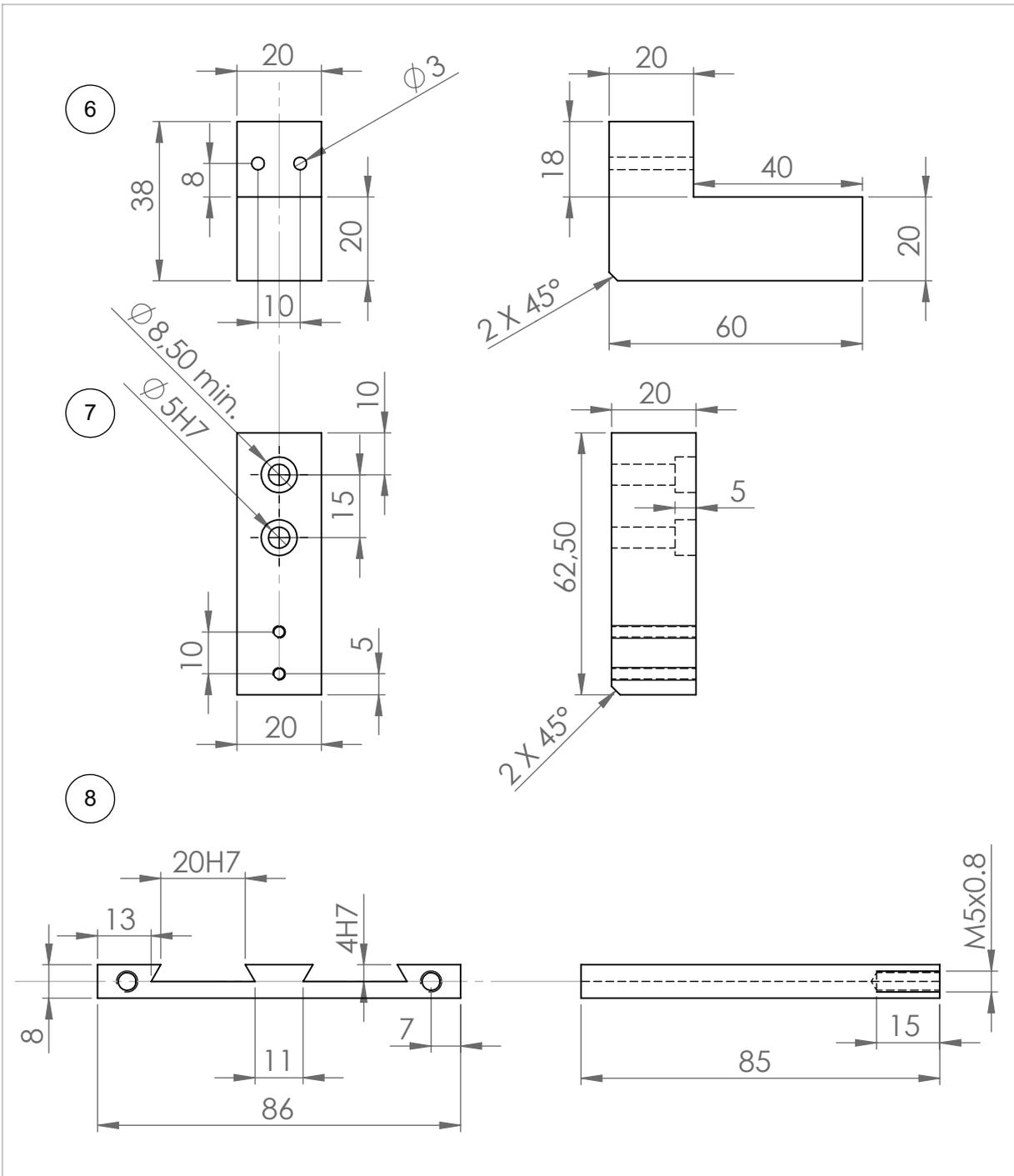


Dados p/ as engrenagens:  
 Módulo = 1.5  
 Nº de dentes = 24  
 Diâmetro primitivo = 36  
 Ângulo de pressão = 20°

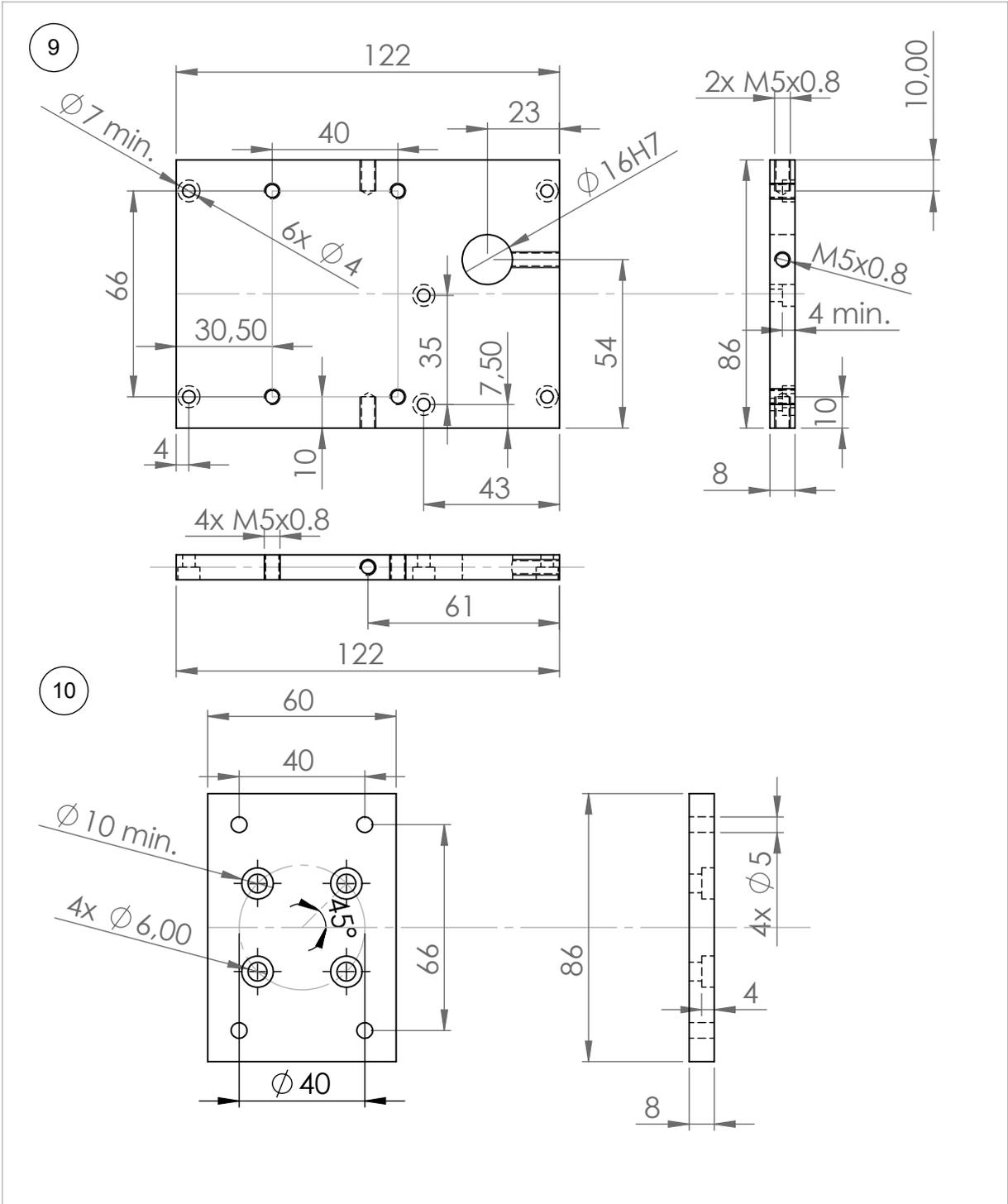
1/16	2	Engrenagem do fuso	Alumínio ABNT 5052 D2" x 25mm	
2/16	1	Engrenagem do motor	Alumínio ABNT 5052 D2" x 40mm	
3/16	2	Fuso Adaptado	Aço Inoxidável TR8x8-D8 x 125mm	
Peça	Qnt.	Nome	Material	
Data: 05/12/2020		Título: Engrenagens e Fuso Adaptado		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B				
Descrição: Engrenagens e adaptação necessária no fuso de modelo comercial TR8 para o acoplamento das mesmas e para o encaixe nos rolamentos.			Escala: <b>1:1</b>	Autor: Alysson A. A. Pereira Unidade: Milímetros (mm) Tolerância: ABNT NBR 6158



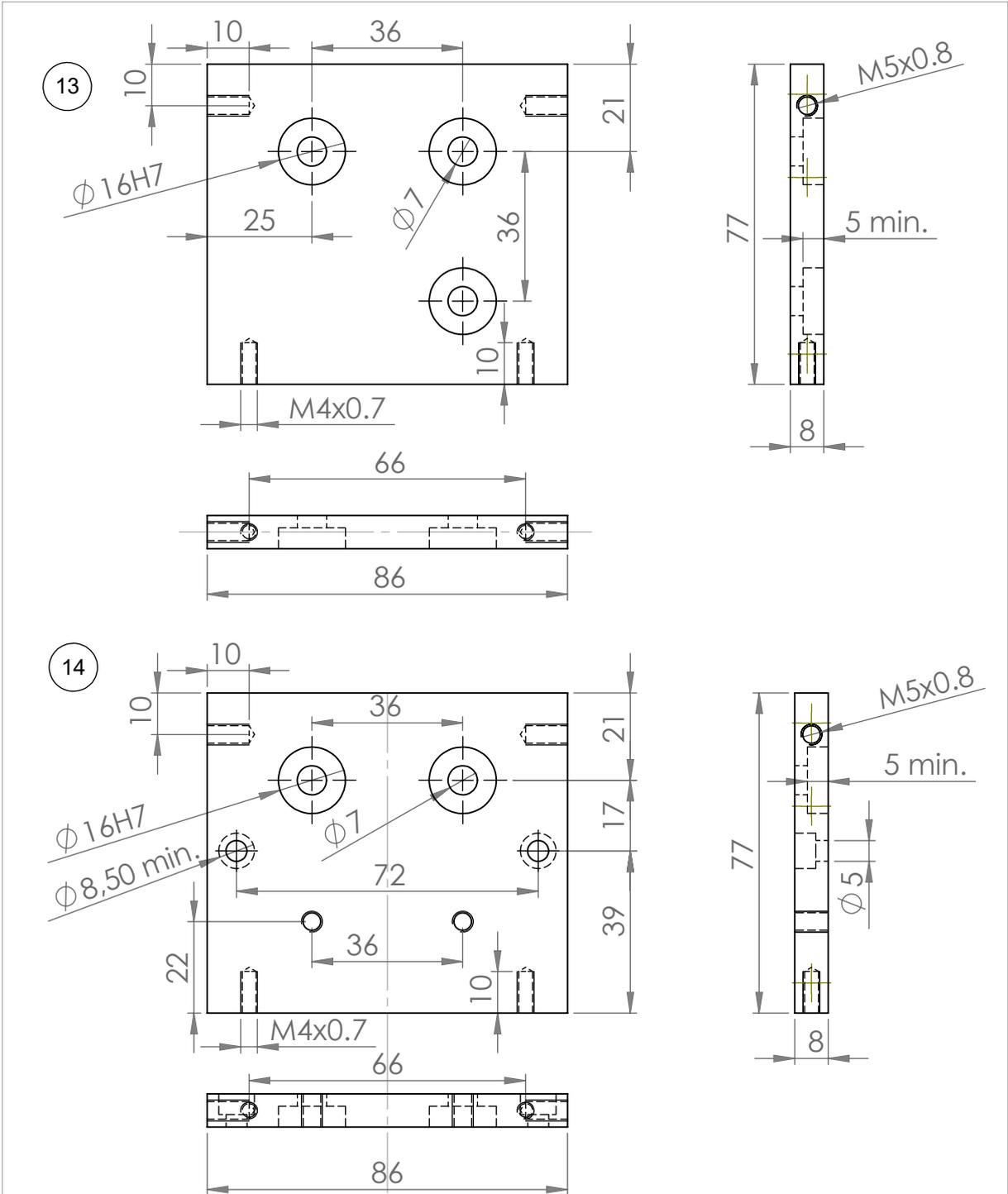
4/16	2	Bloco suporte para castanha	Alumínio ABNT 5052 D2"x40mm	
5/16	2	Castanha adaptada	Latão, Castanha TR8x8	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título:		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B		Componentes para o conjunto de translação		
Descrição:			Escala:	Autor:
Bloco de suporte para castanha e adaptação na castanha TR8.			1:1	Alysson A. A. Pereira
				Unidade: Milímetros (mm)
				Tolerância: ABNT NBR 6158



6/16	2	Peça superior do dedo	Nylon 6.6 65 x 40 x 20mm	
7/16	2	Peça inferior do dedo	Nylon 6.6 65 x 20 x 20mm	
8/16	1	Guia linear	Alumínio ABNT 5052 92x87x8mm	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título: Peças dos dedos e Guia linear		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B				
Descrição: Peças dos dedos da garra e guia de deslizamento linear do tipo rabo de andorinha.			Escala: <b>1:1.5</b>	Autor: Alysson A. A. Pereira Unidade: Milímetros (mm) Tolerância: ABNT NBR 6158

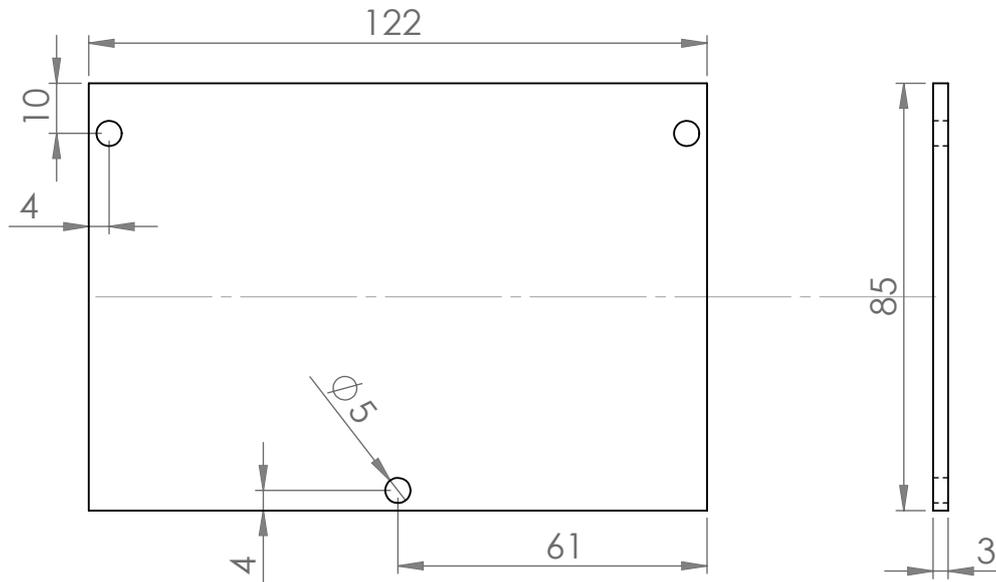


9/16	1	Base inferior	Alumínio ABNT 5052 125x90x8mm	
10/16	1	Interface com o flange	Alumínio ABNT 5052 65x90x8mm	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título: Base da estrutura e Acoplamentos		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B				
Descrição: Base inferior da estrutura, em que serão fixados os demais componentes, e peça do acoplamento entre a ferramenta e o flange do robô.			Escala: <b>1:2</b>	Autor: Alysson A. A. Pereira Unidade: Milímetros (mm) Tolerância: ABNT NBR 6158

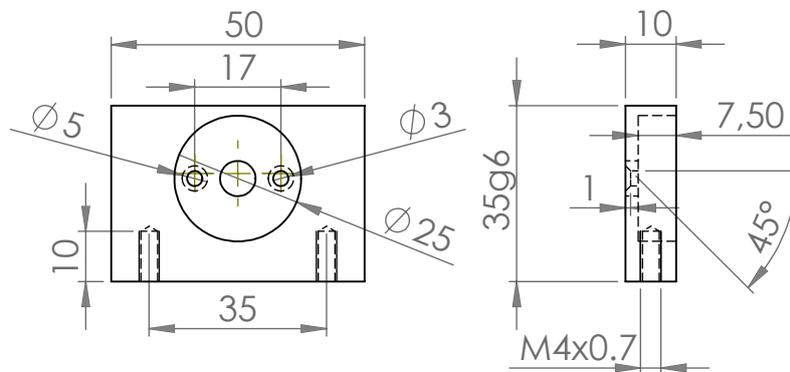


11/16	1	Parede lateral esquerda	Alumínio ABNT 5052 90x80x8mm	
12/16	1	Parede lateral direita	Alumínio ABNT 5052 90x80x8mm	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título: Paredes laterais externas		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B				
Descrição: Paredes externas laterais, em que serão fixados principalmente os rolamentos para os mancais e a guia linear.			Escala: <b>1:1.5</b>	Autor: Alysson A. A. Pereira Unidade: Milímetros (mm) Tolerância: ABNT NBR 6158

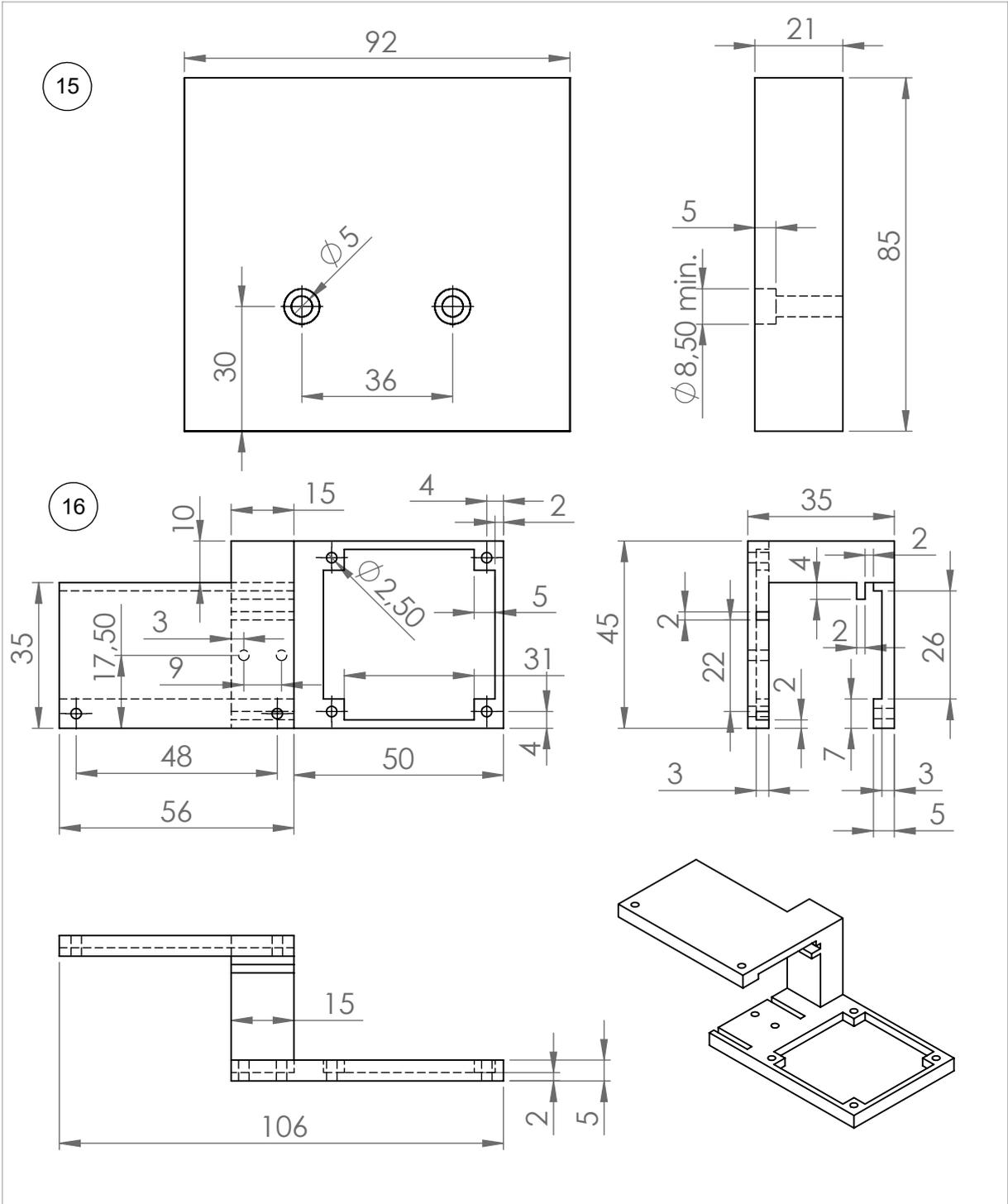
13



14



13/16	2	Parede externa	ABS	
14/16	1	Suporte para o motor	Alumínio ABNT 5052 52x37x12mm	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título:		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B		Paredes externas e Suporte para o motor		
Descrição:			Escala:	Autor:
Paredes externas para o fechamento da estrutura e suporte para o motor.			1:1.5	Alysson A. A. Pereira
				Unidade: Milímetros (mm)
				Tolerância: ABNT NBR 6158



15/16	1	Parede de simetria	ABS	
16/16	1	Suporte para os componentes	ABS	
Peça	Qty.	Nome	Material	
Data: 20/03/2021		Título: Parede de simetria e suporte para os componentes eletrônicos		Vistas: 1º Diedro
Revisão: REV B				
Descrição: Parede adicional para que a estrutura se torne simétrica em relação ao ponto de contato dos dedos da garra e suporte para a fixação dos componentes eletrônicos.			Escala: <b>1:1.5</b>	Autor: Alysson A. A. Pereira Unidade: Milímetros (mm) Tolerância: ABNT NBR 6158

## Listas de Componentes e Custos do Projeto

Tabela B.1 – Peças mecânicas da ferramenta, materiais e processos de fabricação utilizados, parte 1.

Nº	Nome	Material de projeto / utilizado na fabricação	Processos
1	Fuso adaptado	Aço/Aço	Serramento Torneamento
2	Engrenagem do fuso	Alumínio liga 5052-O/ 6351-T6	Torneamento Fresamento Furação Roscamento
3	Engrenagem do motor	Alumínio liga 5052-O/ 6351-T6	Torneamento Fresamento Furação Roscamento
4	Bloco de suporte para castanha	Alumínio liga 5052-O/ 6351-T6	Torneamento Fresamento Furação Roscamento
5	Castanha adaptada	Latão/Latão	Fresamento
6	Peça superior do dedo	Nylon 6.6/Nylon 6.6	Fresamento Furação

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.2 – Peças mecânicas da ferramenta, materiais e processos de fabricação utilizados, parte 2.

<i>N</i> <sup>o</sup>	Nome	Material de projeto / utilizado na fabricação	Processos
7	Peça inferior do dedo	Nylon 6.6/Nylon 6.6	Fresamento Furação Roscamento
8	Guia Linear	Alumínio liga 5052-O/ Aço (reaproveitado)	Serramento Fresamento
9	Base inferior	Alumínio liga 5052-O/ Aço (reaproveitado)	Serramento Furação Roscamento
10	Interface com o flange	Alumínio liga 5052-O/ Aço (reaproveitado)	Serramento Furação Roscamento
11	Parede lateral esquerda	Alumínio liga 5052-O/ Aço (reaproveitado)	Serramento Fresamento Furação Roscamento
12	Parede lateral direita	Alumínio liga 5052-O/ Aço (reaproveitado)	Serramento Fresamento Furação Roscamento
13	Parede externa	ABS/Madeira	Serramento
14	Suporte para o motor	Alumínio liga 5052-O/ 6351-T6	Torneamento Fresamento Furação Roscamento
15	Parede de simetria	ABS/Madeira	Serramento
16	Suporte para os componentes	ABS/ABS	Impressão 3D

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.3 – Custos da montagem da ferramenta, para os circuitos eletrônicos.

Componente	Quantidade	Preço em R\$ (unidade)	Preço em R\$ (total)
<b>Circuito de controle</b>			
Arduino Nano V3	1	32,20	32,20
Ponte H L298N	1	15,93	15,93
Sensor ACS712	1	18,23	18,23
Regulador XL4015	1	16,29	16,29
Conector Mike 8 vias	1	10,00	10,00
Bourne 2 vias	2	3,30	6,60
PCIilhada	1	3,60	3,60
Motor DC 6V 100RPM Encoder	1	109,90	109,90
<b>Total</b>	<b>9</b>		<b>212,75</b>
<b>Placa de comunicação</b>			
CI EL817	6	3,80	22,80
Bourne 3 vias	5	3,80	19,00
Bourne 2 vias	1	3,30	3,30
Socket 6 pinos	4	1,50	6,00
Resistor 1k2 1W	6	0,10	0,60
Resistor 220R	2	0,10	0,20
Resistor 560R	4	0,10	0,40
PCIilhada	1	3,60	3,60
<b>Total</b>	<b>29</b>		<b>55,90</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.4 – Custos da montagem da ferramenta, para as peças mecânicas.

Componente	Quantidade	Preço em R\$ (unidade)	Preço em R\$ (total)		
<b>Elementos mecânicos</b>					
Fuso TR8x8x300	1	36,90	36,90		
Castanha TR8x8	2	13,10	26,20		
Rolamento 625 Zz	5	5,00	25,00		
Parafuso M5x20	4				
Parafuso M5x16	6				
Parafuso M5x10	6				
Parafuso M5X25	2				
Parafuso M6x16	4			20,00	
Parafuso M4x10	6				
Parafuso sem cabeça M5x8	4				
Parafuso M3x12	4				
Parafuso M3x35	4				
<b>Total</b>	<b>48</b>				<b>108,10</b>
<b>Materiais</b>					
Aço					18,00
Nylon 6.6			50,00		
Alumínio 6351-T6			40,00		
Madeira			20,00		
ABS			38,00		
<b>Total</b>			<b>166,00</b>		

Fonte: Próprio autor.

Todos os parafusos utilizados foram do tipo sextavado interno.

O custo total do projeto foi de R\$ 542,75, desconsiderando os fretes, taxas de fabricação e complementos.

# Referências

3DLAB. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D.**

2020. Disponível em:

<<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>.

Acesso em: 16 nov. 2020.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5168:**

**Sistema de tolerâncias e ajustes.** Rio de Janeiro, 1995.

ALLEGRO. **Datasheet Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor ACS712.** [S.l.], 2006.

ARDUINO. **Arduino NANO.** 2021. Disponível em:

<<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

\_\_\_\_\_. **What is Arduino?** 2020. Disponível em:

<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 18 out. 2020.

ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico.** Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2012. ISBN 978-85-352-4521-9.

B&R. **Datasheet X20(c)DO6322.** [S.l.], 2021.

\_\_\_\_\_. **Datasheet X20(c)PS9400.** [S.l.], 2021.

BARRIENTOS, Antonio. **Fundamentos de robótica.** Madrid: McGraw-Hill, Interamericana de España, 2007. ISBN 978-8448156367.

BEER, Ferdinand. **Mecânica vetorial para engenheiros : estática.** Porto Alegre: Grupo A - AMGH, 2012. ISBN 9788580550467.

- BISSON, Andrea. **Development of an interface for intuitive teleoperation of Comau manipulator robots using RGB-D sensors**. 2014. Mestrado em Engenharia da Computação – Universidade de Pádua, Itália.
- BLOMDELL, Anders et al. **Extending an industrial robot controller: Implementation and applications of a fast open sensor interface**. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, v. 12, 2005. DOI: 10.1109/MRA.2005.1511872.
- CALLISTER. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. ISBN 9788521615958.
- CAMARGOS, Rafael Lucas. **Projeto e Construção de Uma Ferramenta de Gravação a Laser em Madeira Para um Robô Industrial**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET-MG, Divinópolis.
- CARBIDEDEPOT. **Coefficient for Static Friction of Steel**. 2020. Disponível em: <<http://www.carbidedepot.com/formulas-frictioncoefficient.htm>>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica vol. 2 – Processos de fabricação e tratamento**. São Paulo: Makron Books, 1986. ISBN 978-0074500903.
- \_\_\_\_\_. **Tecnologia Mecânica vol. 3 – Materiais de construção mecânica**. São Paulo: Makron Books, 1986. ISBN 978-0074500910.
- CHU, Fu-Jen. **Improving Vision-based Robotic Manipulation with Affordance Understanding**. 2020. Tese (Doutorado) – Georgia Institute of Technology.
- COMAU. **PDL2: Programming Language Manual**. Italy, 2014.
- \_\_\_\_\_. **SMART SiX: Technical Specifications**. Italy, 2005.
- CORKE, Peter. **Robotics, vision and control : fundamental algorithms in MATLAB**. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-20143-1.
- DAVIES, E. R. **Machine vision : theory, algorithms, practicalities**. Amsterdam Boston: Elsevier, 2005. ISBN 978-0122060939.
- DINIZ, Anselmo. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. ISBN 978-8587296016.
- DIONÍSIO, Nicolás Henrique Oliveira et al. **Automação do implante de sementes radioativas para braquiterapia**. Mostra Nacional de Robótica (MNR), 2018.

- ELETRÔNICA, Baú da. **Motor DC 6V com Encoder 100 RPM**. 2021. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/motor-dc-6v-com-encoder-100-rpm.html>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- FERRARA, Valentina. **C5GOpen: The latest generation of the Industrial Robots Open Control System for University and SMEs**. 2013. Mestrado em Automação Industrial – Politécnico de Turin, Itália.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Brasil: Blucher, 2003. ISBN 9788521208594.
- FILHO, Marco Stipkovic. **Engrenagens**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.
- FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. Curitiba (PR): InterSaberes, 2017. ISBN 9788559724899.
- GALDINO, Luciano. Cálculo da rotação, do torque e da potência de motores elétricos para transmissão por parafusos de potência. **Augusto Guzzo Revista Acadêmica**, n. 14, p. 215–227, 2014.
- GIMATIC. **2-jaw parallel electric gripper / Gimatic MPLM - Pinze elettriche parallele a due griffe**. 2013. Disponível em: <[https://youtu.be/8fi\\_6P71TVg](https://youtu.be/8fi_6P71TVg)>. Acesso em: 25 out. 2020.
- \_\_\_\_\_. **Grippers**. 2020. Disponível em: <<https://shop.gimatic.com/en/grippers>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- HALLIDAY, David. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: Gen - LTC, 2012. ISBN 9788521619031.
- HEYER, Clint. Human-robot interaction and future industrial robotics applications. In: IEEE. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.: s.n.], 2010. P. 4749–4754.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 978-85-7605-373-6.
- INCOMPLAST. **NYLON (PA)**. 2020. Disponível em: <<https://incomplast.com.br/nylonpa/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- KUROSE, James. **Redes de computadores e a internet : uma abordagem top-down**. São Paulo: Pearson, 2013. ISBN 978-8581436777.

- LUO, Ren C. et al. **Modular ROS Based Autonomous Mobile Industrial Robot System for Automated Intelligent Manufacturing Applications**. In: 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). [S.l.]: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/aim43001.2020.9158800.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo (SP): Blucher, 2015. ISBN 9788521208440.
- MELCHIORRI, Claudio. **Corso di ROBOTICA INDUSTRIALE**. 1994. Laboratório de Automação e Robótica – Universidade de Bolonha, Itália.
- MICHIELETTO, Stefano et al. **ROS-I Interface for COMAU Robots**. Springer International Publishing, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-11900-7\_21. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-11900-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11900-7_21)>.
- NASH, W. A. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.
- NIEMANN, Gustav. **Elementos de máquinas**. São Paulo, Brasil: Blucher, 2018. ISBN 978-8521200345.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 9788582600221.
- OLIVEIRA, André Schneider de et al. **Retrofitting de robôs manipuladores com incorporação de controle de posição e força: aplicação em um robô industrial**. Florianópolis, SC, 2007.
- OONISHI, Ken. **The Open Manipulator System of the MHI PA-10 Robot**. Proceeding of International Symposium on Robotics, Mechatronic Equipment Development & Design Section Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Japan, 1999.
- OSORIO-COMPARAN, Roman et al. **Vision System for a Kuka KR-5 Industrial Manipulator**. In: 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). [S.l.]: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/chilecon47746.2019.8988027.
- PROVENZA, Francesco. **PROTEC - Desenhista de Máquinas**. São Paulo, Brasil: Editora F. Provenza, 1991.
- REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. Curitiba (PR): InterSaber, 2016. ISBN 9788559720396.

- ROMANELLI, Fabrizio et al. **A Modular and Task-oriented Architecture for Open Control System: the Evolution of C5G Open towards High Level Programming**. ICRA, 2010.
- ROS. **About ROS**. 2020. Disponível em: <<https://www.ros.org/about-ros/>>. Acesso em: 18 out. 2020.
- ROZO-GARCÍA, Florelva. Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. **Revista UIS Ingenierías**, v. 19, n. 2, p. 177–192, 2020.
- SCHUNK. **Schunk Grippers**. 2020. Disponível em: <[https://schunk.com/de\\_en/gripping-systems/category/gripping-systems/schunk-grippers/](https://schunk.com/de_en/gripping-systems/category/gripping-systems/schunk-grippers/)>. Acesso em: 25 out. 2020.
- SENAI. **Mecânica: Leitura e Interpretação de Desenho Técnico Mecânico**. Espírito Santo, 1996.
- SHIGLEY, Joseph. **Projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre: Bookman, 2005. ISBN 9788536305622.
- SHOCKMETAIS. **TABELAS DE MEDIDAS, PESOS E INFORMAÇÕES TÉCNICAS**. 2020. Disponível em: <<https://shockmetais.com.br/tabelas/aluminio/pmec>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- SICILIANO, Bruno. **Robotics : modelling, planning and control**. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84628-641-4.
- \_\_\_\_\_. **Springer handbook of robotics**. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
- SILVA, Kesley Roberto Ferreira. **Reconhecimento e Manipulação de Cubos por um Robô Industrial Utilizando Visão Computacional**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET-MG, Divinópolis.
- SPONG, Mark. **Robot modeling and control**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 978-0471649908.
- STMICROELECTRONICS. **Datasheet Dual Full-bridge driver L298**. [S.l.], 2000.
- TODD, D. J. **Fundamentals of robot technology : an introduction to industrial robots, teleoperators and robot vehicles**. London: Kogan Page, 1986. ISBN 978-94-011-6770-3.

---

VAL ROMÁN, José Luis del. Industria 4.0: la transformación digital de la industria. In: PROCEEDINGS of the Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII, Valencia, Spain. [S.l.: s.n.], 2016. P. 10.

VAZ, Maria Vitória Pereira. **Desenvolvimento de uma Ferramenta para o Implante de Sementes para Braquiterapia Manipulada por um Robô Industrial**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET-MG, Divinópolis.

VSCODE. **Visual Studio Code**. 2021. Disponível em:

<<https://code.visualstudio.com/>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, Hindawi Limited, v. 2012, p. 1–10, 2012. DOI:

10.5402/2012/208760. Disponível em: <<https://doi.org/10.5402/2012/208760>>.

XLSEMI. **Datasheet 5A 180KHz 36V Buck DO to DC Converter XL4015**.

[S.l.], 2021.

YOUNG, Hugh. **Sears & Zemansky física I mecânica**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008. ISBN 9788588639300.

ZIMMER. **Handling Technology**. 2020. Disponível em: <<https://www.zimmer-group.com/en/technologies-components/handling-technology>>. Acesso em: 25 out. 2020.