



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ
MANIPULADOR SCARA**

Por,
André Luiz Amorim de Castro

Brasília, 27 de Junho de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ
MANIPULADOR SCARA**

POR,

André Luiz Amorim de Castro

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Walter de Britto Vidal Filho, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, UnB/ ENM

Prof. José Mauricio S. T. da Motta, UnB/ ENM

Brasília, 27 de Junho de 2019

Dedicatória

Dedico o presente trabalho a Fátima Maria Amorim, por todo o suporte e paciência nos momentos críticos de minha formação como indivíduo e profissional.

André Luiz Amorim de Castro

Agradecimentos

Agradeço a toda a equipe do laboratório Aberto de Brasília pelo suporte no desenvolvimento do presente projeto, a meus colegas de curso pelas ideias e dúvidas levantadas e pelo apoio dos técnicos Pereira e Arthur durante o desenvolvimento do projeto.

André Luiz Amorim de Castro

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um braço robótico com morfologia SCARA de boa precisão para aplicações didáticas em salas de aula e laboratórios, de forma a propiciar o contato do estudante de engenharia com manipuladores industriais cada vez mais presentes no mercado. Para isso será realizada a sua definição de características do robô e feito seu dimensionamento e construção, contando ainda com análise de erros para o controle de desvios do manipulador, garantindo assim uma precisão mínima pré-definida.

ABSTRACT

This work aims to develop a robotic arm with SCARA morphology and good accuracy for educational applications in classrooms and laboratories, to provide to the engineering student the contact with industrial robots even more present in the market. In order to do this, it will be carried out the robot's characterization, dimensioning and construction, providing also errors' analysis for the control of deviations of the manipulator, thus guaranteeing a minimum precision predefined.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	OBJETIVO	13
1.3	METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1	DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE	16
2.2	DEFINIÇÃO E MORFOLOGIA DE MANIPULADORES	18
2.3	MORFOLOGIA SCARA	20
2.3.1	Complacência Seletiva	21
2.4	CINEMÁTICA DE MANIPULADORES	22
2.5	ATUADORES E SENSORES	26
2.5.1	Motores de passo	26
2.5.2	Motores DC	27
2.5.3	Motores AC	27
2.6	TRANSMISSÕES E REDUÇÕES	27
2.6.1	Redutor Harmônico	28
2.6.2	Redutor Planetário	28
2.6.3	Redutor parafuso sem fim coroa helicoidal	29
2.6.4	Conjunto Polia e correia	30
2.6.5	Transmissão por Barras	30
2.7	DINÂMICA DE MANIPULADORES	31
3	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	33
3.1	PRIMEIRO SCARA	33
3.2	PROJETOS ANTERIORES	33
3.2.1	Projeto de robô SCARA	34
3.2.2	Projeto de manipulador	36
3.3	PROJETOS ACADÊMICOS	39
3.3.1	Manipulador FUM SCARA	39
3.3.2	Manipulador SCARA – Universidade da Malásia	41
3.3.3	Manipulador SCARA, Instituto Federal de Educação – Pernambuco	41
3.4	ELOS E SUAS FORMAS CONSTRUTIVAS	42
4	PROJETO INFORMACIONAL	44
4.1	LEVANTAMENTO DE NECESSIDADES	44
4.2	ANÁLISE DE MERCADO	45
4.3	EXTRAÇÃO DE REQUISITOS	47
5	PROJETO CONCEITUAL	50
5.1	ANÁLISE POR MATRIZ MORFOLÓGICA	50
5.1.1	Análise de material	51
5.1.2	Análise da geometria dos links	53
5.1.3	Análise do método construtivo	54
5.1.4	Análise da Fixação do manipulador	55
5.1.5	Método de deslizamento das juntas	56
5.1.6	Movimentação vertical	57
5.1.7	Movimentação prismática	58
5.1.8	Sistema de transmissão	58
5.1.9	Reduções	59
5.1.10	Acoplamentos;	60
5.1.11	Atuadores	60
5.1.12	Posição dos atuadores;	61
5.1.13	Sensores	62
5.2	ANÁLISE DE VIABILIDADE	65
5.2.1	Análise de inércia do manipulador	65

5.2.2	Viabilidade de Técnica.....	68
5.2.3	Viabilidade Econômica	70
6	PROJETO PRELIMINAR	72
6.1	MODELAGEM.....	72
6.1.1	Modelo de construção das juntas	73
6.1.2	Mecanismo de movimentação linear.....	75
6.2	ANÁLISE DINÂMICA.....	78
6.2.1	Validação dos resultados	80
6.2.2	Resultados de torque para as juntas.....	82
6.3	ANÁLISE DE RIGIDEZ DOS ELOS.....	83
6.4	PROJETO DA TRANSMISSÃO E REDUÇÃO.....	87
6.4.1	Correias	88
6.4.2	Polias	90
6.4.3	Fixação e tensionamento	91
6.5	PROJETO DE EIXOS.....	92
6.5.1	Escoamento	92
6.5.2	Deflexão	95
6.6	SELEÇÃO DE MANCAIS	95
6.7	SELEÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS	97
7	PROJETO DE DETALHAMENTO.....	99
7.1	Lista de materiais	99
7.2	MONTAGEM E RESULTADOS.....	99
7.3	MANUTENÇÃO.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A.....	1

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PANORAMA DE PAÍSES ABAIXO DA MÉDIA MUNDIAL (IFR, 2017).....	12
FIGURA 1.2 PANORAMA DE PAÍSES ACIMA DA MÉDIA MUNDIAL (IFR, 2017)	13
FIGURA 1.3 FLUXOGRAMA DE PROJETO (ELABORADA PELO AUTOR).....	15
FIGURA 2.1 ESTRUTURA BÁSICA DA MATRIZ DE QFD (CHENG & MELO, 2010)	17
FIGURA 2.2 CORRELAÇÕES USUAIS ENTRE PARÂMETROS (CHENG & MELO, 2010).....	17
FIGURA 2.3 ELEMENTOS FORMADORES DE UM ROBÔ (URREA, 2016)	19
FIGURA 2.4 MODELOS DE JUNTAS (BARRIENTOS, 2007)	20
FIGURA 2.5 MORFOLOGIA DOS MANIPULADORES (BARRIENTOS, 2007)	20
FIGURA 2.6 COMPLACÊNCIA SELETIVA (MAKINO, 2014).....	22
FIGURA 2.7 VISTA SUPERIOR DE ROBÔ SCARA (ELABORADA PELO AUTOR)	23
FIGURA 2.8 REPRESENTAÇÃO DE CADEIA CINEMÁTICA EM ROBÔ SCARA (ELABORADA PELO AUTOR)	23
FIGURA 2.9 REPRESENTAÇÃO MOTOR DE PASSO, IMÃ PERMANENTE (BARRIENTOS, ET AL, 2007).....	26
FIGURA 2.10 ESTRUTURA BÁSICA DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA (BARRIENTOS, ET AL, 2007)....	27
FIGURA 2.11 REDUTOR HARMÔNICO (ECYCLOPEDIA BRITANNICA, 1996)	28
FIGURA 2.12 REDUTOR PLANETÁRIO (FOTO FEITA PELO AUTOR)	29
FIGURA 2.13 SISTEMA PARAFUSO SEM FIM COROA HELICOIDAL (FURTADO, 2017)	29
FIGURA 2.14 CORREIA DENTADA (TELECURSO 2000, 1997)	30
FIGURA 2.15 MANIPULADOR COM TRANSMISSÃO POR CORREIAS (FURTADO, 2017)	30
FIGURA 2.16 MODELO EDUCATIVO IRB460 (LOVEBIRDS, 2018)	31
FIGURA 3.1 REPRESENTAÇÃO DO SEGUNDO PROTÓTIPO SCARA (MAKINO, 2014)	33
FIGURA 3.2 MODELO CAD E MANIPULADOR CONSTRUÍDO (MELLO OPM, 2016).....	34
FIGURA 3.3 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS ADOTADOS (MELLO OPM,, 2016)	34
FIGURA 3.4 ERROS ANGULARES ENTRE AS JUNTAS (ROCHA, 2016).....	35
FIGURA 3.5 MANIPULADOR COM SISTEMA DE REDUÇÃO (ROCHA, 2016)	35
FIGURA 3.6 INCLINAÇÃO DA JUNTA PRISMÁTICA (ROCHA, 2016).....	36
FIGURA 3.7 ERROS ABSOLUTOS DOS PONTOS DE TESTE (ROCHA, 2016).....	36
FIGURA 3.8 MORFOLOGIA DO MANIPULADOR PROJETADO (REIS, 2015)	37
FIGURA 3.9 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS ADOTADOS PELO PROJETISTA (REIS, 2015)	37
FIGURA 3.10 MANIPULADOR PROJETADO (REIS, 2015).....	38
FIGURA 3.11 RESULTADO DO RETROFIT DO MANIPULADOR (FURTADO, 2017).....	38
FIGURA 3.12 MANIPULADOR FUM SCARA(SHARIMATEE,2014).....	39
FIGURA 3.13 FLUXOGRAMA DE PROJETO DA ESTRUTURA FUM SCARA (SHARIMATEE,2014)	40
FIGURA 3.14 MECANISMO DE ACIONAMENTO DA JUNTA PRISMÁTICA (SHARIMATEE,2014)	40
FIGURA 3.15 RESULTADOS COMPARATIVOS MANIPULADOR FUM SCARA (SHARIMATEE,2014)	40
FIGURA 3.16 MANIPULADOR UNIVERSIDADE DA MALAYSIA (SAHARI, 2011)	41
FIGURA 3.17 MODELO DE MANIPULADOR DESENVOLVIDO (NETO, 2015).....	42
FIGURA 3.18 MANIPULADOR SCARA COM LINKS DE ESTRUTURA DE BARRAS (REPRAP, 2018)	43
FIGURA 4.1 DIAGRAMA DE PARETO PARA ANÁLISE DE QFD (ELABORADA PELO AUTOR).....	48
FIGURA 5.1 MANIPULADOR SCARA FABRICADO EM MANUFATURA ADITIVA (JJROBOTS, 2018).....	54
FIGURA 5.2 MANIPULADOR FABRICADO POR USINAGEM DE PLACAS (TZT, 2018)	55
FIGURA 5.3 ESBOÇO SOLUÇÃO 1 (ELABORADA PELO AUTOR)	64
FIGURA 5.4 ESBOÇO SOLUÇÃO 2 (ELABORADA PELO AUTOR)	64
FIGURA 5.5 ESBOÇO SOLUÇÃO 3 (ELABORADA PELO AUTOR)	65
FIGURA 5.6 DISPOSIÇÃO DE MASSA ADOTADA (ELABORADA PELO AUTOR)	66
FIGURA 6.1 SOLUÇÃO FINAL PARA MANIPULADOR (ELABORADA PELO AUTOR)	72
FIGURA 6.2 VISUALIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DAS JUNTAS (ELABORADA PELO AUTOR).....	73
FIGURA 6.3 VISTA SUPERIOR DA SOLUÇÃO (ELABORADA PELO AUTOR).....	73
FIGURA 6.4 VISTA DE CORTE DO ENGASTE DA BASE (ELABORADA PELO AUTOR)	74
FIGURA 6.5 MONTAGEM INTERNA DA PRIMEIRA JUNTA	75
FIGURA 6.6 MONTAGEM INTERNA DA SEGUNDA JUNTA	75
FIGURA 6.7 MECANISMO DE MOVIMENTO LINEAR	76
FIGURA 6.8 VISTA ISOMÉTRICA EM CORTE	76
FIGURA 6.9 VISTA EXPLODIDA PRIMEIRO ELO	77
FIGURA 6.10 VISTA EXPLODIDA SEGUNDO ELO	77

FIGURA 6.11 VISTA EXPLODIDA TERCEIRO ELO	77
FIGURA 6.12 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SCARA	78
FIGURA 6.13 MODELO DE REFERÊNCIA	82
FIGURA 6.14 DIAGRAMA DE FORÇAS EIXO Z	82
FIGURA 6.15 DCL PRIMEIRO ELO	83
FIGURA 6.16 DCL SEGUNDO ELO	84
FIGURA 6.17 DCL TERCEIRO ELO	84
FIGURA 6.18 MOMENTO FLETOR NO PRIMEIRO ELO	85
FIGURA 6.19 MOMENTO FLETOR NO SEGUNDO ELO	85
FIGURA 6.20 MOMENTO FLETOR NO TERCEIRO ELO	86
FIGURA 6.21 PARÂMETROS DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	86
FIGURA 6.22 CURVAS DE DEFLEXÃO (BUDYNAS, 2008)	87
FIGURA 6.23 DIAGRAMA DE FORÇAS PRIMEIRA JUNTA.....	89
FIGURA 6.24 DIAGRAMA DE FORÇAS SEGUNDA JUNTA	89
FIGURA 6.25 PERFIL DA CORREIA SELECIONADA	90
FIGURA 6.26 MODELO DE CARREGAMENTO	90
FIGURA 6.27 SUPORTE TENSIONADOR JUNTA 1	91
FIGURA 6.28 FIXADOR CORREIA INTERROMPIDA	92
FIGURA 6.29 FIXADOR CORREIA EIXO Z	92
FIGURA 6.30 DIAGRAMA DE CORPO LIVRE EIXOS	93
FIGURA 6.31 ESFORÇO CORTANTE PRIMEIRO EIXO	93
FIGURA 6.32 MOMENTO FLETOR PRIMEIRO EIXO	93
FIGURA 6.33 ESFORÇO CORTANTE NO SEGUNDO EIXO	94
FIGURA 6.34 MOMENTO FLETOR NO SEGUNDO EIXO.....	94
FIGURA 6.35 PARAFUSO M10 COM ROSCA PARCIAL.....	95
FIGURA 6.36 ROLAMENTOS SELECIONADOS	96
FIGURA 6.37 MODULO A4988	98
FIGURA 6.38 MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO	98
FIGURA 6.39 PLACA CNC SHIELD V3.....	98
FIGURA 7.1 TESTE DE TOLERÂNCIA PARA BLOCOS DA JUNTA	100
FIGURA 7.2 MANIPULADOR MONTADO	100
FIGURA 7.3 MANIPULADOR MONTADO 2.....	101
FIGURA 7.4 TESTE DE PERPENDICULARIDADE ENTRE SUPERFÍCIES.....	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UM MANIPULADOR SCARA	25
TABELA 4.1 ORGANIZAÇÃO DAS NECESSIDADES	45
TABELA 4.2 ANÁLISE DE MERCADO.....	46
TABELA 4.3 MANIPULADORES ANALISADOS	46
TABELA 4.4 CLASSIFICAÇÃO DE REQUISITOS	48
TABELA 5.1 MATRIZ MORFOLÓGICA DO MANIPULADOR	50
TABELA 5.2 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	51
TABELA 5.3 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA OS LINKS	52
TABELA 5.4 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA AS JUNTAS	52
TABELA 5.5 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA A BASE	53
TABELA 5.6 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA A SUPERFÍCIE DE TRABALHO	53
TABELA 5.7 DADOS DE MATERIAL CONSULTADOS	53
TABELA 5.8 SELEÇÃO PARA GEOMETRIA DOS LINKS.....	54
TABELA 5.9 ANÁLISE DO MÉTODO DE FABRICAÇÃO	55
TABELA 5.10 ANÁLISE DE FIXAÇÃO DOS LINKS.....	56
TABELA 5.11 ANÁLISE DE FIXAÇÃO DA BASE	56
TABELA 5.12 MATRIZ DE DECISÃO MÉTODO DE DESLIZAMENTO	57
TABELA 5.13 ANÁLISE DO MOVIMENTO VERTICAL	58
TABELA 5.14 MATRIZ DE DECISÃO PARA A MOVIMENTAÇÃO PRISMÁTICA	58
TABELA 5.15 ANÁLISE DA TRANSMISSÃO	58
TABELA 5.16 ANÁLISE SISTEMA DE REDUÇÃO	59
TABELA 5.17 ANÁLISE DO ACOPLAMENTO	60
TABELA 5.18 ANÁLISE DOS ATUADORES	61
TABELA 5.19 ANÁLISE DA POSIÇÃO DOS ATUADORES	61
TABELA 5.20 ANÁLISE DO SENSOR	62
TABELA 5.21 PARÂMETROS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS	63
TABELA 5.22 ELEMENTOS PRESENTES NOS CONCENTRADORES DE MASSA	66
TABELA 5.23 PARÂMETROS ESTIMADOS PARA A ANÁLISE DE INÉRCIA	67
TABELA 5.24 RESULTADOS COMPARATIVOS DE INÉRCIAS E TORQUES.....	68
TABELA 5.25 ANÁLISE DE BENEFÍCIOS DA SOLUÇÃO 1	68
TABELA 5.26 ANÁLISE DE BENEFÍCIOS DA SOLUÇÃO 2	69
TABELA 5.27 ANÁLISE DE BENEFÍCIOS DA SOLUÇÃO 3	70
TABELA 5.28 ANÁLISE DE ATENDIMENTO AOS REQUISITOS	70
TABELA 6.1 PROPRIEDADES DE MASSA ATRIBUÍDAS	81
TABELA 6.2 VELOCIDADES E ACELERAÇÕES ATRIBUÍDAS.....	81
TABELA 6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DINÂMICA	83
TABELA 6.4 REAÇÕES NOS ELOS	84
TABELA 6.5 RESULTADOS DA ANÁLISE DE RIGIDEZ	87
TABELA 6.6 PARÂMETROS DA REDUÇÃO	89
TABELA 6.7 PARÂMETROS DE CARREGAMENTO DAS POLIAS	91
TABELA 6.8 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DOS EIXOS	94
TABELA 6.9 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS EIXOS	95
TABELA 6.10 DEFLEXÕES DOS EIXOS.....	95
TABELA 6.11 ESTIMATIVA DE VIDA DOS ROLAMENTOS	97
TABELA 6.12 MOTORES SELECIONADOS.....	97
TABELA 7.1 LISTA DE MATERIAIS.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
I	Momento de inércia	[kg.m ²]
L_i	Comprimento do elemento i	[mm]
v	Velocidade	[m/s]
m	Massa	[kg]
d	Diâmetro	[mm]
d_l	Densidade linear	[kg/m]

Símbolos Gregos

α	Ângulo de perfil de rosca	[°]
θ	Ângulo de junta	[°]

Sobrescritos

•	Variação temporal
-	Valor médio

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
CNI	Confederação nacional da Indústria
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
IFR	International Federation of Robotics
QFD	Quality Function Deployment
ISO	International Organization of Standardization

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os aspectos que motivaram o presente trabalho assim como o seu objetivo específico a ser alcançado e a metodologia de projeto implementada para o desenvolvimento do manipulador didático.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A automação da indústria vem crescendo a cada ano, vista a necessidade de acelerar processos produtivos e reduzir a presença do ser humano em condições de risco ou em tarefas repetitivas. Com o surgimento da indústria 4.0 onde a automação ganha maior importância, devido a proposta de uma linha de produção flexível e inteligente, o uso de manipuladores industriais se torna cada vez mais recorrente como salienta SEBRAE (2016). No ano de 2017, o Brasil possuía cerca de 18 mil manipuladores em operação no país, o que significa uma escala de 10 robôs a cada 10 mil trabalhadores no chão de fábrica (Figura 1.1), enquanto isso a Coreia do Sul lidera o ranking com 631 manipuladores a cada 10 mil trabalhadores (Figura 1.2), levando em conta o setor automobilístico, dentre outros. Estes dados mostram o gargalo de produtividade que a indústria brasileira tem em relação a automação da produção o que acaba prejudicando a indústria nacional pela baixa competitividade como mostrado por CNI (2017), sendo o manipulador industrial um dos aliados para a superação dessas dificuldades. Outros dados mostram que 69% dos postos de trabalho são automatizáveis no setor industrial brasileiro e que a criação de habilidades na área de programação e robótica é indispensável para a capacitação do profissional para esse mercado segundo estudo de Mckinsy Global Institute (2017).



Figura 1.1 Panorama de países abaixo da média mundial (IFR, 2017)



Figura 1.2 Panorama de países acima da média mundial (IFR, 2017)

Uma das funções dos manipuladores utilizados na indústria é de transporte e posicionamento de componentes tanto em montagens como em classificação de produtos. Uma configuração muito usada para essa tarefa surgiu no ano de 1978 na Universidade de Yamanashi no Japão (Makino, 2014) sendo denominada como configuração SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), representando uma montagem com duas juntas rotacionais e uma prismática se diferenciando das demais por trabalhar em planos paralelos ao eixo principal, essa montagem foi amplamente disseminada em linhas de montagem pela sua complacência no plano de deslocamento angular e rigidez nos deslocamento vertical o que promove excelente execução das atividades de montagem de componentes e classificação/organização de produtos.

É nesse contexto que o presente trabalho se desenvolve, buscando criar uma ferramenta para aproximar a formação acadêmica dos estudantes de engenharia da crescente automação da indústria, propiciando o contato e o aprendizado do estudante junto aos manipuladores.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo o projeto e a construção de um manipulador didático de configuração SCARA que apresente bons resultados de precisão e repetibilidade para a aplicação em ambientes de ensino e uso em bancadas de laboratórios, com o fim de complementar o aprendizado do aluno de engenharia, propiciando o contato do mesmo com braços manipuladores usados na automação de processos produtivos.

1.3 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A metodologia de desenvolvimento adotada para o projeto foi inspirada na Metodologia de Projeto de Pahl & Beitz (Pahl, et al, 2007) que divide o projeto em 4 fases principais, sendo elas projeto informacional, conceitual, preliminar e projeto detalhado, respectivamente.

Projeto informacional: Etapa responsável por levantar informações acerca do projeto, desde entrevistas com clientes para o estabelecimento dos requisitos e das funções a serem desempenhadas, assim como condições do ambiente de trabalho. Nessa etapa é levantado o estado da arte acerca do projeto de manipuladores entre outras informações que são necessárias para a seleção dos requisitos técnicos mais importantes para o sucesso do projeto.

Projeto conceitual: Com os requisitos técnicos bem claros, o projeto conceitual tem como função destrinchar as funções do produto e buscar formas de atender a cada uma dessas funções. Uma vez encontradas as alternativas de solução individuais de cada função, é possível montar os modelos de solução globais que serão classificados de acordo com os parâmetros do projeto e, por fim, realizada a seleção do modelo que melhor atende as especificações do projeto.

Projeto preliminar: Com o modelo de solução definido passamos então ao projeto técnico do produto gerando assim uma concepção preliminar e realizando a análise mais técnica da estrutura para garantir que o modelo final atenda aos requisitos levantados no projeto informacional.

Projeto detalhado: Após a validação do modelo adotado e com a concepção do projeto já definido começa a parte de elaboração das especificações técnicas finais e toda a documentação do projeto para a finalização e fabricação do modelo.

A metodologia de projeto acima descrita também foi suplementada por ferramentas como a ferramenta da casa da Qualidade (QFD) que busca uma classificação e priorização de requisitos de projeto que melhor atendem as necessidades do cliente. Outra é a ferramenta de matriz morfológica que auxilia na solução do modelo, ao dividi-lo em funções básicas e, a partir da combinação das soluções para cada função podem ser gerados os modelos de solução para o problema por completo. Com base nessa metodologia de projeto e nas ferramentas acima citadas, foi elaborado o fluxograma de projeto apresentado na Figura (1.3).



Figura 1.3 Fluxograma de projeto (Elaborada pelo autor)

Dessa forma, o **projeto informacional** adotado consiste da pesquisa acerca de manipuladores e suas formas construtivas, gerando maior compreensão das aplicações dos manipuladores e das soluções existentes no mercado e na comunidade acadêmica. Seguido disso, vem a análise das necessidades junto a usuários de manipuladores, estudantes e técnicos que será, juntamente com os dados obtidos da análise de manipuladores comerciais, a base para a extração e definição dos requisitos do projeto. Dando início ao **projeto conceitual**, é realizada a análise das funções do manipulador, onde para cada aspecto a ser solucionado, serão geradas alternativas de solução que após avaliadas, serão combinadas para formar soluções completas para o manipulador, passando depois essas soluções por verificações de acordo com a possibilidade de execução e em relação ao atendimento dos requisitos definidos. Feita a seleção da solução mais adequada, o **projeto preliminar** inicia com a modelagem tridimensional da solução contando com o auxílio de ferramentas CAD. De forma a controlar os erros geométricos do manipulador e manter a precisão de posicionamento dentro de um intervalo aceitável ao projeto, é feita uma análise de desvios admissíveis entre os juntas, essa análise guiará o projeto mecânico da estrutura e a definição de tolerâncias de fabricação dos componentes, em seguida é realizada a seleção de componentes eletrônicos do manipulador e os desenhos de técnicos iniciais. Ao concluir o projeto preliminar damos início ao **projeto de detalhamento** onde serão atribuídas as tolerâncias de fabricação e confeccionado o manual de montagem do manipulador, dando origem assim aos desenhos de fabricação que guiarão a construção do manipulador.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma base de conhecimentos necessários para a boa compreensão do desenvolvimento do presente trabalho. A seguir são apresentados brevemente conhecimentos sobre ferramentas que auxiliaram no projeto assim como aspectos básicos sobre o projeto construção e controle de manipuladores industriais.

2.1 DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE

A ferramenta de Desdobramento da Função Qualidade (QFD, do inglês Quality Function Deployment) foi desenvolvida no fim da década de 60 pelos professores Yoji Akao e Shigeru Mizuno no Japão (Cheng & Melo, 2010), ganhando o mundo quando se tornou evidente o sucesso de empresas japonesas como Toyota no controle da qualidade dos produtos. A ferramenta de QFD é amplamente utilizada em projetos de produtos industriais e desde 1995 se tem relatos de uso na indústria brasileira automobilística e de alimentos.

O objetivo da metodologia de QFD é, a grosso modo, traduzir a voz do cliente em requisitos técnicos a serem contemplados para que se alcance o grau de qualidade esperado, atendendo assim as necessidades do cliente. Através desta técnica é possível traduzir e quantificar nas etapas do desenvolvimento do produto, os vários requisitos que vão ao encontro às necessidades dos consumidores, buscando atender inclusive as necessidades implícitas, que caso não atendidas podem gerar prejuízo a qualidade do projeto, com isso, a metodologia de QFD busca aumentar a satisfação do cliente e otimizar o tempo gasto no desenvolvimento do projeto.

O processo de QFD é realizado através de matrizes que decompõem as necessidades do cliente e os requisitos técnicos a elas relacionados. Para isso inicialmente são obtidas as necessidades do produto por meio de entrevistas e pesquisas junto cliente ou ao consumidor final do produto, a partir dessas consultas, as necessidades levantadas são questionadas de forma a se encontrar o real motivo pelo qual cada uma delas foi listada, e com a compreensão do motivo de cada necessidade, é possível extrair as necessidades reais do cliente, inclusive as que estejam implícitas ou ocultas, sendo elas de grande importância para a satisfação do cliente e para a garantia da qualidade do produto.

De posse das necessidades do cliente uma tabela, normalmente chamada de Qualidade Exigida, é montada de maneira a organizar as necessidades em grupos e categorias de acordo com o grau de relação entre elas, obtendo a partir do nível mais detalhado os chamados **Elementos da Qualidade**. Com isso, as reais necessidades extraídas (elementos da qualidade) podem ser avaliadas pelo cliente que as classifica de acordo com a importância que ele relaciona ao produto. Essa classificação é feita por meio de uma pontuação numérica em que valores maiores sugerem maior importância entre a necessidade avaliada e a qualidade do projeto.

Com a tabela de qualidade exigida formada é possível se extrair a tabela de **Características da Qualidade**, formada pelos requisitos técnicos mensuráveis que atendem as necessidades levantadas. Com as duas tabelas finalizadas é feita a montagem da matriz básica de QFD onde os elementos da qualidade formam as linhas e as características da qualidade são dispostas em colunas, pode-se ver na Fig. (2.1) um exemplo de matriz para o desenvolvimento de um modelo de isqueiro. Com a matriz formada, se avalia a relação entre cada necessidade e cada um dos requisitos levantados. Esse grau de relação costuma ser sinalizado simbolicamente ou numericamente, como o uso dos valores 0, 1, 3 e 9, representando nenhuma relação, baixa relação, média relação e alta relação respectivamente. Formas de correlações usuais podem ser vistas na Figura (2.2).

Características da qualidade \ Qualidades exigidas	Altura	Peso	Durabilidade	Pressão de acendimento	Operacionalidade	Variedade de cores	Grau de interesse das mulheres
Acender sem falhas			3	9	3		
Fácil de usar	9	9			3		
Carregar com segurança	3	1	9	3			
Poder usar por longo tempo			9	3	3	1	
É um modelo bonito	3	3				9	3
Sentir apego			1		1	3	9

Figura 2.1 Estrutura básica da matriz de QFD (Cheng & Melo, 2010)

Correlação	Representação sugerida				
	Cor	Símbolo	Valores possíveis sugeridos		
Forte	Vermelho	⊙	9	5	4
Média	Verde	△	3	3	2
Fraca	Azul	○	1	1	1
Inexistente		Vazio	-	-	-

Figura 6.7 – Definições para as correlações da matriz de QFD.

Figura 2.2 Correlações usuais entre parâmetros (Cheng & Melo, 2010)

Com a classificação do nível de importância de cada uma das necessidades e o grau de correlação destas com cada requisito técnico, pode-se calcular o **peso absoluto e relativo** dos requisitos, para se obter a classificação destes. Um exemplo de matriz de QFD relacionando as necessidades (tabela de Qualidade Exigida) com os requisitos técnicos (tabela de Características da Qualidade) é mostrado na Figura (2.1).

2.2 DEFINIÇÃO E MORFOLOGIA DE MANIPULADORES

O conceito de robô manipulador, ainda hoje, não está completamente uniformizado, mas uma das primeiras associações a estabelecer uma definição formal foi a RIA (Robotics Industries Association anteriormente conhecida como Robot Institute of America) que definiu um robô manipulador industrial em 1979 da seguinte forma (Barrientos, et al, 2007):

“Um robô manipulador industrial é um manipulador multifuncional reprogramável, capaz de mover materiais, peças, ferramentas e dispositivos especiais, de acordo com trajetórias variáveis, programado para realizar tarefas diversas.”

Essa primeira tentativa de se estabelecer uma definição formal curta e concisa deu origem a atual definição da ISO (International Organisation for Standardisation) que, segundo a norma ISO 8373, define um robô industrial como um manipulador controlado automaticamente, reprogramável, multifuncional com três ou mais eixos e que pode ser utilizado em aplicações industriais de automação em posição fixa ou em movimento (ISO 8373, 2012).

Mesmo que as definições possam variar em diferentes países, algumas convenções se encontram hoje bem disseminadas como é o caso das morfologias dos manipuladores e de seus componentes. Alguns desses elementos são descritos abaixo e ilustrados na Figura 2.3) para dar ao leitor maior compreensão da morfologia dos manipuladores.

- **Elos (Links):** são os elementos que distanciam e conectam os graus de liberdade de forma rígida, podendo apresentar diferentes formatos e configurações construtivas.
- **Juntas:** são os elementos que interligam os links propiciando o movimento relativo entre os mesmos, podendo apresentar diferentes morfologias a serem vistas em seguida.
- **Efetuator terminal:** é a ferramenta utilizada para realizar um trabalho específico (como um maçarico de solda, uma pistola de pintura, uma garra, entre outros), ligado à articulação final do robô.
- **Atuadores:** funcionam como os músculos do robô. O controlador envia os sinais aos atuadores para que eles possam movimentar uma ou mais articulações. Exemplos de atuadores empregados: servo motores, motores de passo, atuador pneumático, atuador hidráulico. A escolha do atuador depende da aplicação pretendida.
- **Sensores:** são utilizados para obtenção de dados do ambiente, ou do próprio manipulador, em que o robô está inserido, como possíveis obstáculos, ou a posição das juntas.

- **Controladores:** São utilizados para a implementação do controle da movimentação do robô. O controlador recebe informações dos sensores de forma a definir os parâmetros de saída, controlando assim, os atuadores e coordenando os movimentos.

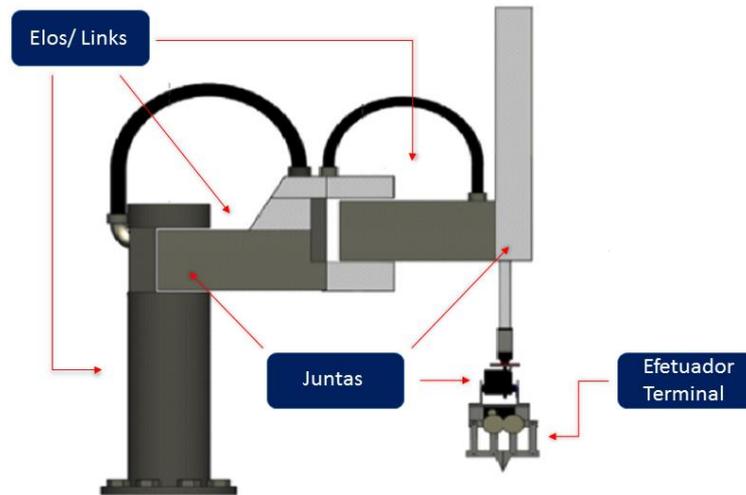


Figura 2.3 Elementos formadores de um robô (Urrea, 2016)

A classificação de manipuladores pode ser feita por diversas características da estrutura do manipulador, por exemplo, pelo número de graus de liberdade da estrutura cinemática, pela geometria do espaço de trabalho e características do movimento, pelo tipo de controle e acionamento, porém a mais usual é classificar os robôs de acordo com a composição de suas juntas (Barrientos, et al, 2007), que dentre as várias formas (Figura 2.4), se destacam as seguintes:

Prismática (deslizante): Este tipo de junta permite o movimento linear entre dois vínculos. É composto de dois corpos alinhados em uma direção de forma a restringir a movimentação relativa entre os corpos em uma translação unidimensional.

Rotativas: Esta conexão permite movimentos de rotação entre dois vínculos. O movimento relativo entre os corpos, mais uma vez, é restringido de forma unidimensional, possibilitando que os membros da articulação possam rotacionar em relação a um eixo comum aos corpos.

Esférica: Esta conexão se comporta como uma combinação de 3 juntas de rotação, permitindo movimentos de rotação em torno dos 3 eixos que se cruzam em um ponto comum. Para se ter o efeito de uma junta esférica, muitos robôs incluem 3 juntas rotativas cujos eixos de rotação se cruzam em um ponto.

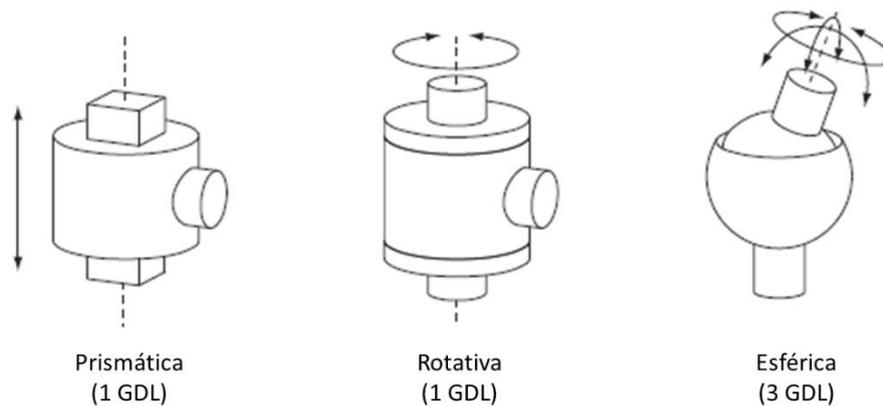


Figura 2.4 Modelos de juntas (Barrientos, 2007)

As estruturas mais comuns de manipuladores industriais se diferem pela composição das juntas, que no caso da configuração SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), adotada no presente projeto, é composta por duas ou três juntas rotativas e uma prismática. As demais configurações mais comuns podem ser vistas na Figura (2.5).

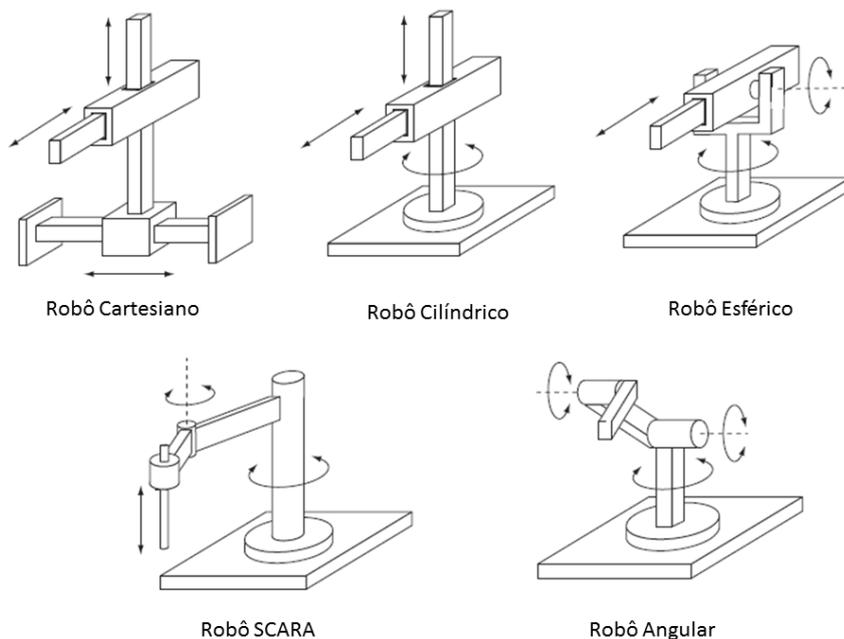


Figura 2.5 Morfologia dos manipuladores (Barrientos, 2007)

2.3 MORFOLOGIA SCARA

A morfologia SCARA, descrita na contextualização, é muito empregada em montagens de componentes eletrônicos, e se destaca principalmente por sua complacência seletiva, característica essa que deu nome a morfologia. O primeiro SCARA foi desenvolvido pelo professor Hiroshi Makino e seus colegas (integrantes do grupo “SCARA research group”) com finalidades industriais (Makino, 2014). Desde então ela foi disseminada pela indústria dando origem a uma nova categoria de manipulador, pois

embora tenha a mesma composição de juntas de um manipulador esférico/polar, se difere de tal por sua facilidade de trabalhar em planos horizontais e por possuir redundância no posicionamento de peças, permitindo esse contornar obstáculos que possam existir no espaço de trabalho.

Devido ao paralelismo dos eixos da morfologia SCARA, que se aproximam do mecanismo de um braço humano, ele tem maior facilidade para se movimentar encurtando e alongando o braço o que confere a ele maior velocidade e precisão, tudo isso com um baixo custo quando comparado as demais morfologias. Um dos fatores que beneficiam a redução de custos e destaca a morfologia SCARA é o baixo torque exigido dos motores, pois sua composição de eixos paralelos alinhados com a vertical elimina a necessidade dos motores (com exceção da junta prismática) de trabalharem contra a gravidade para compensar a inércia dos links, sendo assim os motores trabalham apenas para vencer o atrito e a inércia rotacional do manipulador e do objeto movimentado.

2.3.1 Complacência Seletiva

A complacência pode ser entendida como a capacidade de adaptação ou acomodação em relação ao meio no qual está inserido, no caso de manipuladores robóticos, a capacidade de admitir pequenas correções de posicionamento quando sujeito a esforços de contato com o ambiente de trabalho. Um problema típico em montagens é o de encaixe entre pinos e furos (conhecido como “peg and hole”), dessa forma, para um encaixe bem sucedido na ausência de complacência do manipulador (braço muito rígido) é necessária uma precisão suficientemente maior que a tolerância do conjunto e ainda assim podendo não ocorrer a correta montagem.

Uma solução para o correto acoplamento do conjunto é a criação de faces guias para a montagem (chanfros nas arestas do pino e do furo), que quando combinadas com a complacência seletiva no plano de posicionamento, desempenha a tarefa de guiar o encaixe de forma a se obter êxito na tarefa (Makino, 2014). Note, que a complacência deve ser seletiva, de forma que a posição axial do pino seja rigidamente determinada pois a complacência em todos os eixos pode gerar um desvio de axialidade entre o pino e o furo (Figura 2.6 (b)).

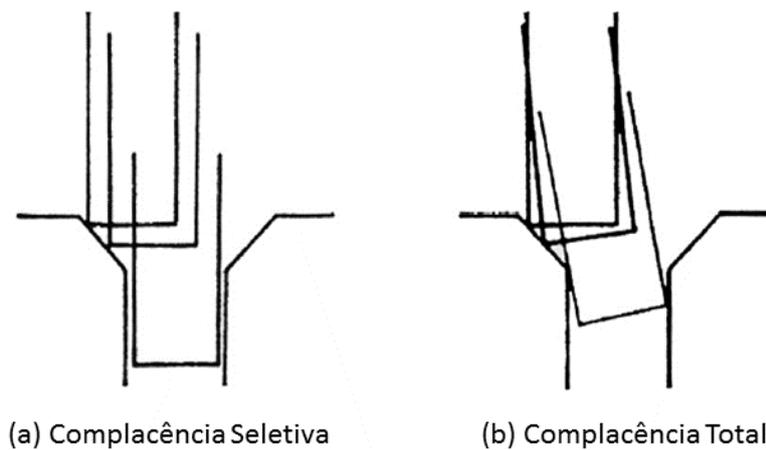


Figura 2.6 Complacência Seletiva (Makino, 2014)

2.4 CINEMÁTICA DE MANIPULADORES

A cinemática de um manipulador consiste no estudo do movimento do manipulador em relação a um sistema de referência fixo, considerando apenas as relações de posição e suas derivadas temporais, sem levar em conta os esforços que geram tais movimentos. Sendo assim a cinemática de robôs busca descrever o movimento espacial do manipulador como uma função do tempo, mais especificamente busca as relações analíticas de posição e orientação entre a extremidade da cadeia cinemática do manipulador e o sistema de referência definido. Dessa forma, a cinemática de manipuladores busca as relações entre as variáveis de juntas (posição, velocidade e aceleração) e as variáveis do espaço de trabalho do manipulador (Barrientos, et al, 2007).

O problema cinemático se divide em dois na análise de robôs, sendo eles, o **problema cinemático direto** que busca determinar a posição e orientação da extremidade do manipulador em função das coordenadas de juntas definidas, e no **problema cinemático inverso** que busca conhecer as variáveis articulares em função de uma posição e orientação definidas no espaço de trabalho.

Existem alguns métodos para se obter a cinemática direta, o mais simplificado e mais usado é o método geométrico onde a relação entre o sistema de referência da base e a posição e orientação do efetuador terminal se dá pelas relações geométricas de seno e cosseno entre os elos e as coordenadas de juntas do manipulador. O método geométrico apresenta bons resultados e fácil aplicação para manipuladores de poucos graus de liberdade, porém, dificulta a correção numérica de erros oriundos da fabricação como paralelismo entre os eixos, sendo assim a qualidade dos resultados depende diretamente da precisão das dimensões do manipulador e da correta montagem dos eixos de movimentação. Para o presente projeto, o método geométrico gera simplificações bastante atrativas devido ao número reduzido de graus de liberdade e a simplicidade da geometria dos links. Um exemplo de cinemática direta pelo

método geométrico é apresentado na Figura (2.7), tendo como base o modelo de projeto desenvolvido anteriormente por Mello OPM, (2016), mostrado na Figura (2.8).

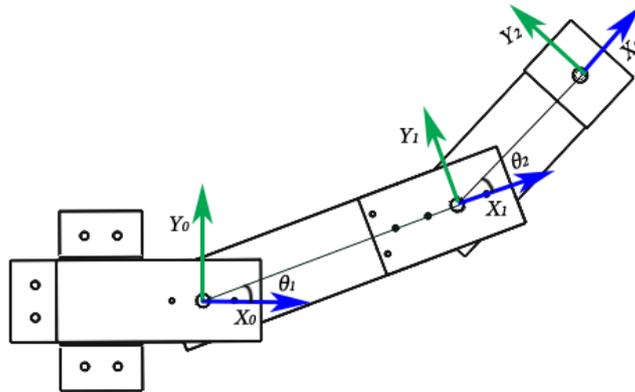


Figura 2.7 Vista superior de robô SCARA (Elaborada pelo autor)

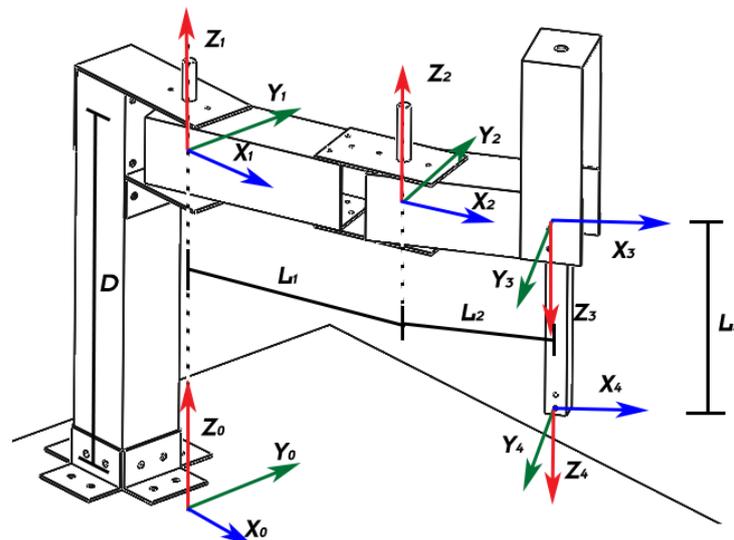


Figura 2.8 Representação de cadeia cinemática em robô SCARA (Elaborada pelo autor)

Com isso o posicionamento da extremidade do braço manipulador, (X_2, Y_2) conforme a Figura (2.7), em relação ao referencial da base (X_0, Y_0) pode ser obtido pelas Eq. (1) e (2), deduzidas a partir de relações trigonométricas.

$$X_0 = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$Y_0 = L_1 \sin(\theta) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

O valor de Z_0 , presente na Eq. (62) é a diferença de altura entre a base fixa (distância D) e o valor da junta prismática (L_3). Os valores L_1 e L_2 são as distâncias entre os sistemas de referência.

$$Z_0 = D - L_3 \quad (3)$$

A cinemática inversa, que relaciona as coordenadas de junta em função das coordenadas do espaço de trabalho, pode ser obtida por uma manipulação algébrica, realizando o isolamento das coordenadas angulares como demonstra Barrientos, et al, (2007). Obtendo assim as Eq.(4) e (5).

$$\theta_2 = \pm \cos^{-1} \left(\frac{X_0^2 + Y_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{Y_0}{X_0} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{L_2 \operatorname{sen}(\theta_2)}{L_1 + L_2 \operatorname{cos}(\theta_2)} \right) \quad (5)$$

Uma vez que, para manipuladores com mais de três ou quatro graus de liberdade o método geométrico pode se tornar complexo, uma outra forma de realizar a cinemática de manipuladores surge com base na álgebra vetorial e matricial, onde, com o uso de matrizes homogêneas (Barrientos, et al, 2007), que relacionam as posições e orientações dos elos do manipulador, é possível criar uma cadeia cinemática e ao final obter uma matriz de transformação que relaciona a posição e orientação do sistema de coordenada de interesse (efetuador terminal do manipulador) e o sistema de referência da base. Assim, de posse dessa matriz de transformação e das coordenadas de junta adotadas é possível definir a posição espacial e orientação do fim da cadeia cinemática.

Contudo, mesmo para a definição de uma matriz homogênea que relaciona dois sistemas quaisquer, são necessários seis graus de liberdade (uma rotação e translação para cada eixo), visto isso, na cinemática de manipuladores foi desenvolvida uma metodologia que permite reduzir de 6 para apenas 4 operações (duas rotações e duas translações) necessárias para localizar um sistema de coordenada em relação a outro. Essa representação é conhecida por notação de Denavit-Hartenberg, nela consta uma série de passos e recomendações sobre a melhor forma de posicionar os sistemas de coordenada. A notação de Denavit-Hartenberg (também chamada de método de D-H) pode ser vista passo a passo em Barrientos et al, (2007) e em trabalhos anteriores como Furtado (2017).

O método de D-H reduz o número de operações para quatro, sendo eles uma rotação θ em torno de z, translação de d na direção z, translação de a na direção x e uma rotação de α em torno do eixo x, necessariamente nessa ordem, além disso, essas operações dependem apenas de fatores geométricos e do estado das coordenadas de junta adotado. Para o manipulador apresentado na Figura (2.8), foram desenvolvidas as matrizes de transformação com base nos parâmetros da Tabela (2.1). Nas equações abaixo a matriz de transformação que referencia o sistema de índice (i) em relação ao sistema de índice (j) é denotada pela expressão A_i^j .

Tabela 2.1. Parâmetros geométricos de um manipulador SCARA

	θ	Z	L	α
A_1^0	0	d	0	0
A_2^1	θ_1	0	L_1	0
A_3^2	θ_2	0	L_2	π
A_4^3	0	L_3	0	0

Cada uma das matrizes de transferência entre os sistemas de coordenada é obtida pelo produto das matrizes de rotação e translação previstas na metodologia de D-H, usando assim dos parâmetros presentes na Tabela (2.1) da forma como é apresentada Eq. (6), onde $R_i(j)$ representa a rotação de j em torno do eixo i, e $T_i(j)$ representa a translação de j no sentido do eixo i .

$$A_i^{i-1} = R_z(\theta_i) * T_z(d_i) * T_x(a_i) * R_x(\alpha_i) \quad (6)$$

Dessa forma são encontradas as matrizes de transformação de um membro da cadeia cinemática para o próximo. A matriz de transformação tem o aspecto da mostrada na Eq. (7), Onde S e C representam seno e cosseno, respectivamente.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C \alpha_i S\theta_i & S \alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C \alpha_i C\theta_i & -S \alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S \alpha_i & C \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

E com as matrizes montadas basta realizar a sua multiplicação para se obter a matriz de transformação do para o manipulador, como na Eq. (8).

$$T = A_1^0 A_2^1 \dots A_i^{i-1} \quad (8)$$

Dessa forma obtemos a matriz mostrada na Eq. (9), feita para o modelo da Figura (2.8).

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1 \text{sen}(\theta_1) + L_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & D - L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde os elementos $T_{1,4}$, $T_{2,4}$ e $T_{3,4}$ representam, respectivamente as coordenadas X, Y e Z da extremidade do manipulador.

2.5 ATUADORES E SENSORES

Manipuladores industriais tem uma ampla variedade de atuadores que podem ser, elétricos, pneumáticos, hidráulicos dentre outros. Sendo os hidráulicos mais usados quando a operação é para movimentação de elevadas cargas, o que não se aplica no caso do presente trabalho principalmente devido a alto custo do sistema de suporte para a pressurização.

Os atuadores pneumáticos são mais usados quando se requer precisão de posicionamento para apenas duas posições (posições de cilindro vazio e cilindro cheio), pois a compressibilidade dos gases os tornam imprecisos em posições intermediárias, além disso precisam de sistema de suporte com compressor para o acionamento dos pistões, o que torna desinteressante para o presente projeto. Devido aos fatores acima citados e a compatibilidade com pequenas cargas e baixo custo e volume do sistema, os atuadores elétricos se mostram mais interessantes e atualmente são os mais usados em manipuladores industriais e serão melhor apresentados a seguir.

2.5.1 Motores de passo

Motores de passo podem ser divididos em três categorias, motor com ímã permanente, de relutância variável e o híbrido que é a combinação dos dois anteriores. O motor de ímã permanente tem como princípio o alinhamento do rotor (ímã permanente) com as bobinas que o rodeiam, essas bobinas são acionadas então de forma a criar a rotação, um exemplo de motor de passo de ímã permanente pode ser visto na Figura (2.9).

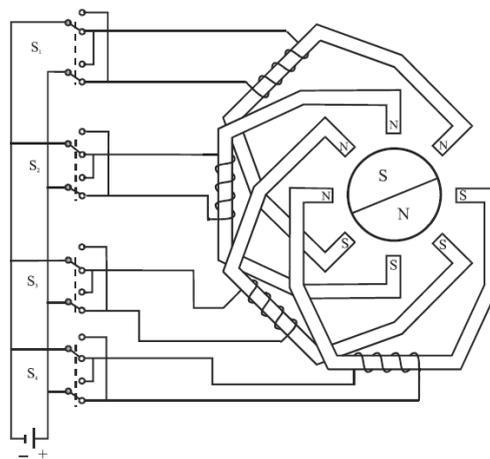


Figura 2.9 Representação motor de passo, ímã permanente (Barrientos, et al, 2007)

O funcionamento do motor de relutância variável tem seu rotor composto de material ferro magnético que busca se alinhar com a orientação que facilita o fluxo das linhas de campo magnético gerado pelas bobinas. Por fim o motor híbrido é a combinação dos dois princípios que garante uma maior precisão aos motores de forma a reduzir o passo, sem a necessidade de um número de bobinas proporcional. O acionamento de motores de passo se dá pelo chaveamento ordenado entre as bobinas, para isso, hoje já existem a disposição circuitos especiais para a realização de tal chaveamento.

2.5.2 Motores DC

Se tratam dos motores mais usados e difundidos devido a simplicidade construtiva e facilidade de controle. Ele é composto por duas partes gerais, sendo elas o indutor e o induzido, o indutor se localiza na parte estática do motor e é responsável por gerar um campo magnético fixo, já o induzido é o rotor que quando alimentado por corrente contínua gera um campo magnético a sua volta. A conversão de energia elétrica em mecânica de forma contínua ocorre de maneira que os campos tanto do indutor como do induzido se mantenham estáticos entre si e em quadratura para que o torque magnético seja o máximo possível. Um exemplo de motor de corrente contínua é mostrado na Figura (2.10).



Figura 2.10 Estrutura básica de motor de corrente contínua (Barrientos, et al, 2007)

2.5.3 Motores AC

Embora não tenham sido usados para a construção de manipuladores nos primeiros anos do desenvolvimento da robótica, principalmente devido a dificuldade de controle desse tipo de atuador, com as melhorias realizadas em motores síncronos (onde a velocidade de giro depende apenas da frequência da tensão aplicada ao motor) foi viabilizada sua aplicação na robótica industrial, e, hoje se configura como o tipo de atuador elétrico mais usado em manipuladores no chão de fábrica. Seu controle de forma mais precisa foi viabilizado com a construção de rotores síncronos sem escovas, que aumentam a capacidade de resfriamento do motor devido ao contato do enrolamento com a carcaça do motor, o uso de conversores de frequência que permite o controle de motores síncronos com maior precisão e o emprego da eletrônica que permite um controle mais fino da posição (Barrientos, 2007). A grande vantagem que destaca esse motor para aplicação em robótica é a sua maior relação entre potência e peso, quando comparado com motores de corrente contínua. Seu princípio de funcionamento é muito parecido com o do motor DC porém ele costuma ser empregado no formato de acionamento trifásico, de forma que o enrolamento instalado no estator é dividido em três, para que o giro do motor seja controlado pela diferença de fase entre as bobinas.

2.6 TRANSMISSÕES E REDUÇÕES

Existem vários mecanismos de transmissão de movimento para aplicação na área da robótica industrial, desde elementos flexíveis como polias e correias a elementos rígidos como barras e redutores.

Mecanismos de redução são amplamente aplicados vista a alta velocidade e baixo torque comum aos motores comerciais (sem incluir os de passo) dessa forma, uma redução tem o papel de balancear essas variáveis (velocidade e torque) de forma a possibilitar o acionamento e controle de forma rápida e precisa. Já as transmissões, tem o grande objetivo de permitir a remoção do atuador da posição da junta, visto que a maior potência dos manipuladores é gasta para movimentar a inércia do braço, a possibilidade de deslocar esses elementos para posições mais estratégicas de forma a distribuir melhor a massa do manipulador e reduzir a potência solicitada para movimentação é um aspecto importante de projeto. Dentre os elementos de redução e transmissão existentes, alguns são apresentados abaixo, a consulta de outros elementos pode ser feita no trabalho de Furtado (2017).

2.6.1 Redutor Harmônico

Redutores harmônicos são elementos de redução que possibilitam reduções elevadas de até 60:1 em um espaço muito compacto, sua estrutura é baseada em três peças principais, uma coroa rígida de dentes internos (circular spline), um tubo/copo flexível com dentes externos (flexspline) e um rotor elipsoidal (wave generator) que mantém a coroa e o tubo engrenados em alguns pontos de contato. O detalhe que realiza a redução é a diferença entre o número de dentes do tubo e a coroa rígida que costuma ser de um ou dois dentes, é essa diferença no número de dentes que gera um movimento relativo entre esses dois elementos e dessa forma a cada volta do rotor elipsoidal o copo gira um ângulo muito pequeno em relação a coroa, e esse ângulo depende do número de dentes da coroa. Um exemplo desses redutores é mostrado na Figura (2.11).

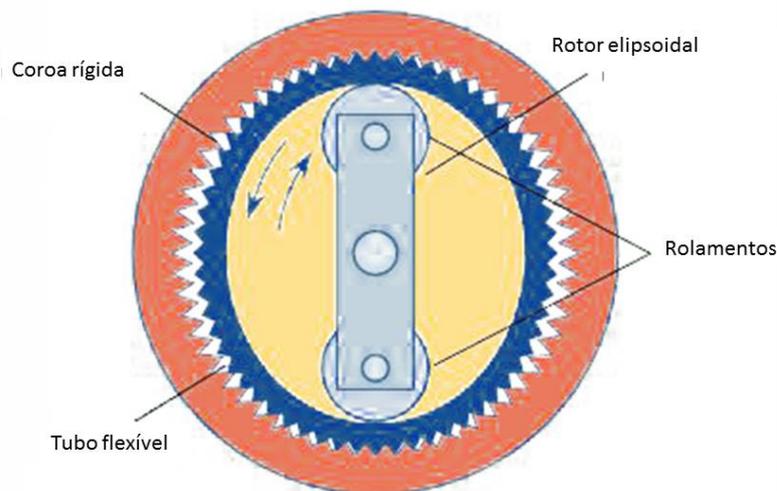


Figura 2.11 Redutor harmônico (Eyclopedia Britannica, 1996)

2.6.2 Redutor Planetário

O redutor planetário é um mecanismo famoso por ser compacto e pela possibilidade de ligação em série, ele basicamente é composto por três elementos principais sendo eles, uma engrenagem anelar de dentes internos, uma engrenagem central (solar) e um conjunto de engrenagens menores (planetárias)

que são ligadas a um braço para manter seu espaçamento. Neste mecanismo a rotação de entrada pode ser inserida na engrenagem solar que transmite o movimento em forma de rotação e translação as engrenagens planetárias e por fim estas transmitem o movimento de rotação para a engrenagem anelar de onde pode ser retirada uma redução bastante elevada (em média 5:1). Uma ilustração do mecanismo de redução é mostrada na Figura (2.12).

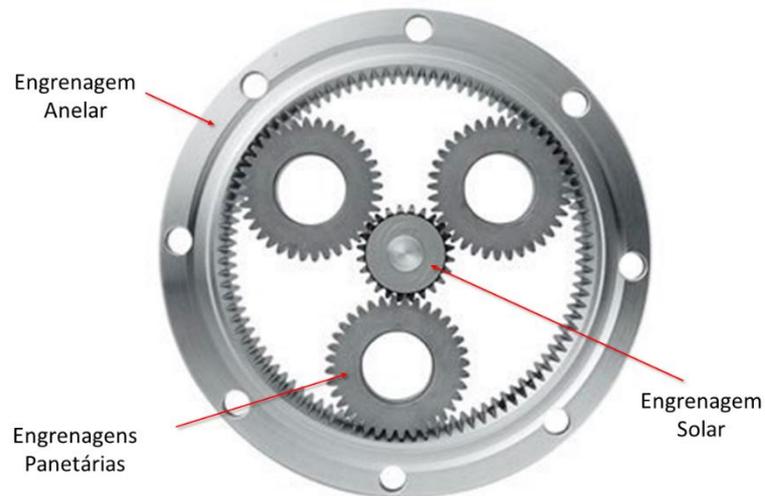


Figura 2.12 Redutor planetário (Foto feita pelo autor)

2.6.3 Redutor parafuso sem fim coroa helicoidal

O conjunto de parafuso sem fim e coroa é muito usado para a realização de grandes reduções em um pequeno espaço, conta ainda com uma característica de auto travamento a depender do ângulo de hélice da rosca do sem fim. Há porém, desvantagens no uso do conjunto sem fim coroa, enquanto reduções por engrenagens tem rendimento de 98%, uma redução com parafuso sem fim em banho de óleo não possui rendimento superior a 60%, sendo assim uma redução com o conjunto sem fim acarreta em grande perda de potência, e exige grande atenção com relação a manutenção do lubrificante. Um exemplo de aplicação desse tipo de redução é mostrado na Figura (2.13).

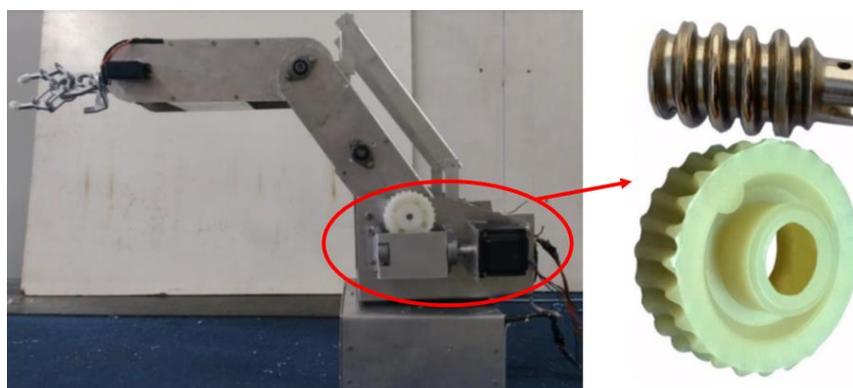


Figura 2.13 Sistema parafuso sem fim coroa helicoidal (Furtado, 2017)

2.6.4 Conjunto Polia e correia

A transmissão por correias é uma das mais usadas, um dos benefícios de seu uso é a grande distância de transmissão entre eixos. As correias comerciais mais comuns são fabricadas externamente em borracha para garantir a aderência entre as superfícies, e possuem cabos de aço internos de forma a reduzir a flexibilidade do elemento e possibilitar a transmissão de potência entre os elementos. Para a aplicação na robótica apenas são usadas as correias síncronas ou dentadas, visto que essas reduzem a possibilidade de deslizamento entre as superfícies de transmissão, no caso do uso de correias lisas o deslizamento entre as superfícies acarretaria na perda do controle de posição como é o caso mostrado Reis (2015). O uso de correias de borracha ainda assim adiciona flexibilidade a transmissões, o que pode ser controlado com o tensionamento da correia. Um exemplo de correia dentada pode ser visto nas Figura (2.14) e Figura (2.15).

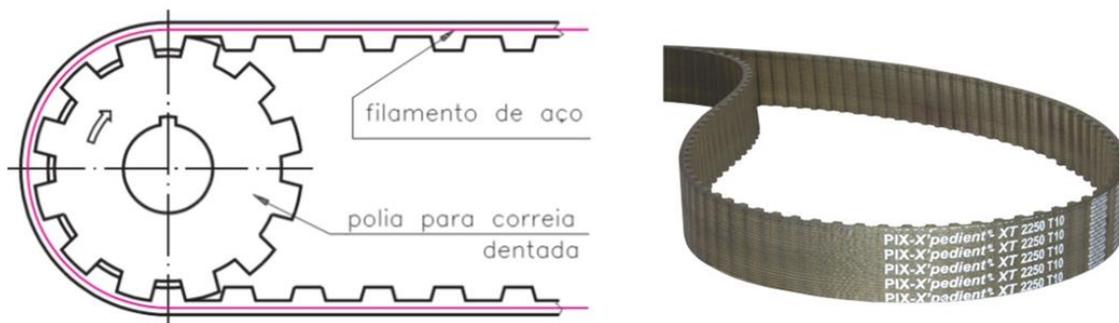


Figura 2.14 Correia dentada (Telecurso 2000, 1997)



Figura 2.15 Manipulador com transmissão por correias (Furtado, 2017)

2.6.5 Transmissão por Barras

O uso de barras para a transmissão entre eixos é uma forma eficiente de transmissão com a vantagem do uso de um elemento mais rígido que reduza folgas na transmissão, assim, gerando uma maior precisão no posicionamento, porém há o efeito da limitação do movimento na junta, como é o caso do modelo

educativo IRB460 mostrado na Figura (2.16). Vale ressaltar que o uso de barras na transmissão adiciona peso ao manipulador, que a depender da distância de transmissão, gera ainda a necessidade de uma fabricação bem planejada de forma a se garantir uma montagem com folgas reduzidas e encaixes precisos.

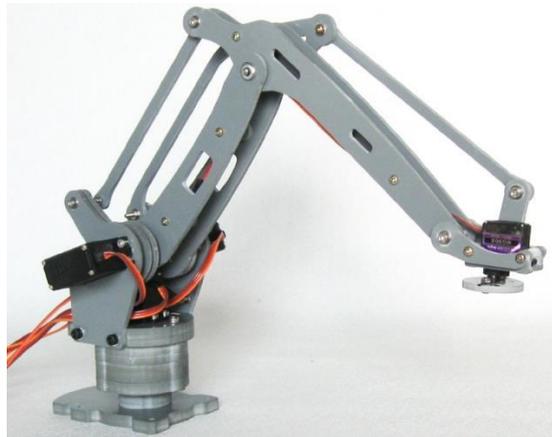


Figura 2.16 Modelo educativo IRB460 (Lovebirds, 2018)

2.7 DINÂMICA DE MANIPULADORES

A obtenção do modelo dinâmico de um manipulador é de extrema importância para a identificação dos esforços atuantes na estrutura, e a obtenção dos torques de acionamento das juntas. Há duas abordagens mais comuns de se realizar a modelagem dinâmica de um manipulador, uma delas é pela aplicação do equilíbrio da estrutura de acordo com a segunda lei de Newton, e a lei de Euler (apresentadas nas Eqs. 10 e 11). A outra forma de se chegar as relações dinâmicas do manipulador é pela abordagem de Lagrange que usa uma análise de energias envolvidas no sistema. Embora ambas conduzam ao mesmo resultado, a abordagem pelo equilíbrio de forças é mais indicada para manipuladores com poucos graus de liberdade, visto que o aumento destes cria uma modelagem mais complexa. Já a abordagem de Lagrange (aplicada com o uso das Eqs. 12 e 13), embora seja aplicável a qualquer manipulador, é mais indicada para a análise de cadeias cinemáticas com maior número de graus de liberdade. Para a aplicação da abordagem de Lagrange um parâmetro (L), denominado lagrangiano, é definido pela Eq.(12), e ao tomar a derivada deste parâmetro em relação as variáveis de junta pode-se obter o torque necessário ao acionamento, conforme a Eq.(13). Mais detalhes, a respeito da abordagem de lagrange podem ser consultados nas referências Mello OPM, (2016), Sahari (2011) e Barrientos (2007). Para fins práticos, a modelagem dinâmica será mais detalhada durante o projeto mecânico do manipulador.

$$\sum F = \frac{d}{dt}mv \quad (10)$$

$$\sum T = \frac{d}{dt}I\omega = I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) \quad (11)$$

$$L = E_c - E_p \quad (12)$$

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (13)$$

Onde m representa a massa do sistema, v a velocidade, I a inércia de rotação, ω a velocidade de rotação, q a coordenada angular da junta, E_c e E_p energia cinética e potencial respectivamente.

3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como objetivo apresentar os modelos e construções bem como os resultados obtidos para projetos anteriormente desenvolvidos, levantando assim o estado da arte da construção de manipuladores com foco na morfologia SCARA.

3.1 PRIMEIRO SCARA

O primeiro protótipo desenvolvido no Japão pelo professor Makino foi concebido com quatro graus de liberdade sendo acionados com o uso de servo motores DC, usando encoders óticos e possuindo redutores harmônicos para a transmissão do movimento. Mais tarde com o uso de motores DC com tacogeradores foi construído o segundo protótipo SCARA, apresentando menor vibração e melhores curvas de movimento. A configuração e dimensões do segundo protótipo são mostradas na Figura (3.1).

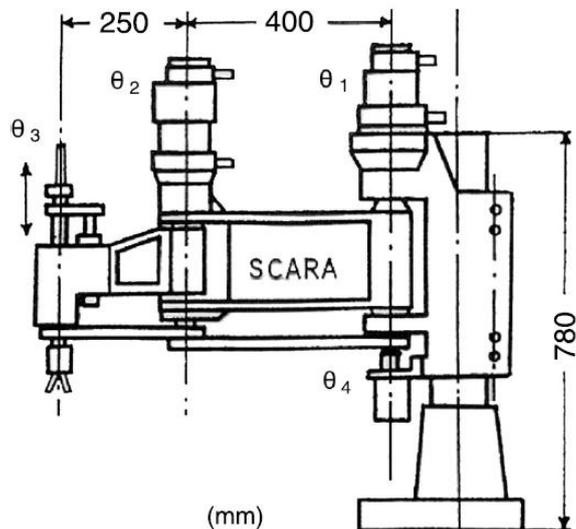


Figura 3.1 Representação do segundo protótipo SCARA (Makino, 2014)

Na morfologia mostrada acima os dois primeiros graus de liberdade movimentam as juntas rotacionais dos elos por meio dos motores posicionados acima das juntas, o terceiro grau de liberdade é a junta prismática acionada por um cursor rosqueado que se desloca verticalmente com o giro de um parafuso de potência. E o quarto grau de liberdade é comandado por um motor posicionado junto a base que tem seu movimento transmitido por correias sincronizadas para a rotação do efetuador terminal, vale ressaltar que existem diferentes formas construtivas para o manipulador SCARA.

3.2 PROJETOS ANTERIORES

Anteriormente ao presente projeto, foram desenvolvidos dentro da universidade de Brasília projetos de manipuladores didáticos e posteriormente seus testes e aprimoramentos, sendo assim é de extrema

importância a análise das construções para que o presente projeto possa evitar as dificuldades e problemas enfrentados anteriormente nos projetos já realizados. Os dois projetos analisados consistem em uma primeira construção de um modelo SCARA e em um projeto de robô articulado de 6 graus de liberdade.

3.2.1 Projeto de robô SCARA

Anterior ao presente projeto, foi desenvolvido uma primeira versão para construção de um manipulador SCARA didático, como é mostrado em Mello OPM, (2016). Nessa primeira versão, a estrutura foi montada com os links fabricados de perfil retangular com perfurações para encaixe das juntas, estas sendo fabricadas por corte e dobra de chapas de alumínio. A construção apresenta assim baixo peso e custo de fabricação, porém durante o projeto nota-se a ausência de uma análise das juntas, visto que apenas foi realizado o projeto para deflexão dos links. Dessa forma é possível notar a erros de construção que geram imprecisão no controle do manipulador, de acordo com Mello OPM, (2016) o erro de posicionamento medido foi de até 1,4 cm, o que torna o manipulador muito impreciso para uso em montagem ou geração de trajetórias, mesmo para aplicações educativas. Na Figura (3.2) é mostrada a geometria construtiva do manipulador e na Figura (3.3) os parâmetros construtivos adotados.

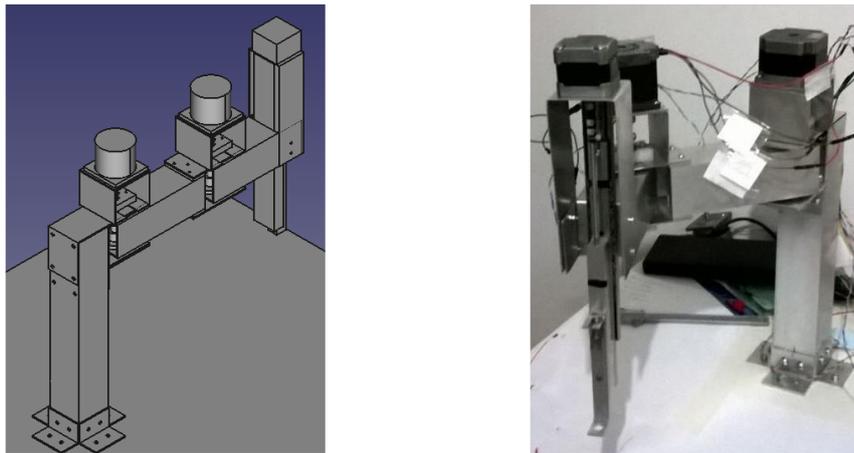


Figura 3.2 Modelo CAD e manipulador construído (Mello OPM, 2016)

Elo	Tipo de Junta	Comprimento [mm]	Alcance Rotacional [°]	Alcance Linear [mm]
1	Rotacional	168	0 - 180	-
2	Rotacional	112	0 - 180	-
3	Prismática	250	-	0 - 100

Figura 3.3 Parâmetros construtivos adotados (Mello OPM., 2016)

Em uma análise do manipulador percebe-se que a deflexão causada entre as juntas é substancial e acarretada principalmente pelo projeto das juntas, uma vez que a precisão de fabricação e a rigidez das juntas de chapa dobrada é insuficiente para uma construção rígida do manipulador. O uso de motores de

passo para a construção mostra excelente repetibilidade do manipulador devido a discretização das coordenadas angulares do atuador, porém o uso de tais motores também gera vibração no movimento do manipulador e deixa o movimento de decida lento e impreciso devido a vibração do motor e ao uso de uma barra roscada como elemento transdutor.

Seguida a construção do manipulador descrito em Mello OPM, (2016), foi realizado um trabalho de medição, melhorias, e correção da cinemática do manipulador por meio de seu controle, como pode ser visto em Rocha (2016). Primeiramente foram levantadas as posições relativas entre os elos do manipulador de forma a estimar os erros geométricos a serem corrigidos. Para isso foi usado um braço de medição presente na universidade (maiores detalhes em Rocha, 2016), os resultados da medição mostraram que um dos causadores dos erros de posicionamento do manipulador foi a estrutura das juntas pois os resultados apresentam erros angulares de até $1,4^\circ$ onde o esperado para boa precisão seria o paralelismo dos eixos. Os dados de ângulos entre as juntas obtidos são mostrados na Figura (3.4).

RETA 1	RETA 2	ÂNGULO MEDIDO	ÂNGULO DESEJADO	ERRO
Junta 1	Junta 2	0.6592°	0°	-0.6592°
Junta 1	Junta 3	1.1857°	0°	-1.1857°
Junta 2	Junta 3	1.4140°	0°	-1.4140°

Figura 3.4 Erros angulares entre as juntas (Rocha, 2016)

Além da medição do manipulador, foi também realizado por Rocha (2016), a implementação de polias e correias como forma de transmissão e redução, buscando assim o aumento do torque na junta do manipulador, e que dessa forma o movimento do motor fosse mais suave com o uso do acionamento em meio passo das bobinas do motor. O manipulador final pode ser visto na Figura (3.5) onde é possível notar a deflexão da primeira junta do manipulador, na Figura (3.6) é possível notar o erro de alinhamento do eixo z mesmo a olho nú.



Figura 3.5 Manipulador com sistema de redução (Rocha, 2016)



Figura 3.6 Inclinação da junta prismática (Rocha, 2016)

Por fim, o trabalho desenvolvido por Rocha (2016) na correção de posicionamento do manipulador por meio do ajuste de parâmetros cinemáticos obteve uma redução do erro de posicionamento, embora o erro da cinemática continue apreciável como pode ser visto na Figura (3.7) que mostra os erros de posicionamento obtidos pelos testes realizados. Na fig. (3.7) a primeira linha da tabela representa os diferentes pontos usados para análise e na segunda e terceira linhas os erros para cada um dos eixos coordenados e a última linha a resultante dos erros nos eixos coordenados.

	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	Média
X	2	5	1	5	7	6
Y	0	4	2	3	2	2.2
Plano	2	6.4031	2.2360	5.8309	7.2801	4.75

Figura 3.7 Erros absolutos dos pontos de teste (Rocha, 2016)

Em sua conclusão, Rocha (2016) cita como elementos a serem aprimorados, como a transmissão flexível na primeira junta que torna o posicionamento do manipulador pouco rígido, e a instalação de sensores de fim de curso para permitir o robô retornar a posição de referência sem ação manual do operador.

3.2.2 Projeto de manipulador

Neste projeto, desenvolvido inicialmente por Reis (2015), foi adotada a construção de um manipulador didático de 6 graus de liberdade com a morfologia mostrada na Figura (3.8), a solução adotada durante o projeto foi de uso de chapas de aço parafusadas para a criação da estrutura como um todo, usando também, um sistema de transmissão composto por polias e cabos, vista a necessidade de

remover os atuadores das juntas já que o manipulador trabalha contra a gravidade e qualquer adição de peso e inércia rotacional reduz sua capacidade de movimentação. Ao final da análise foram definidos os parâmetros construtivos do manipulador conforme mostra a Figura (3.9).

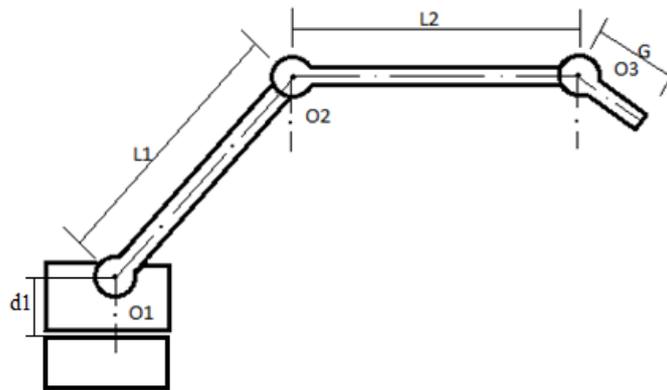


Figura 3.8 Morfologia do manipulador projetado (Reis, 2015)

Limites Angulares		Parâmetros construtivos	
Base	± 90	Link	Dimensão (mm)
Ombro	$-60/+130^\circ$	D1	114
Cotovelo	$\pm 130^\circ$	L1	230
Punho	$\pm 135^\circ$	L2	230
Garra	$\pm 360^\circ$	G	167.32

Figura 3.9 Parâmetros construtivos adotados pelo projetista (Reis, 2015)

Nesse trabalho foi feita a análise de rigidez dos links, porém pouco estudo acerca do projeto das juntas e sistema de transmissão, gerando assim o modelo da Figura (3.10) com custo estimado de R\$ 3.028 ,00. Sendo ele mais tarde usado em teste de precisão e repetibilidade, como mostrado em Mello MSV (2016), onde o manipulador teve sua transmissão alterada para um sistema de polia e correia lisas com o uso de superfície áspera (folha de lixa). Dada a atualização, os testes revelaram um erro de precisão variando entre 2,2 e 7,45 mm, que embora seja um valor elevado, está dentro da média de robôs industriais segundo Mello MSV, (2016). Foi aferido também um erro de repetibilidade entre 23 e 43,16mm para diferentes posições do manipulador, o autor responsável pelos testes indica que esse erro é atribuído ao deslizamento das correias em movimentos ascendentes.

Dados os resultados dos testes, foi dado início a uma revisão (retrofit mecânico) do manipulador conforme pode ser visto em Furtado (2017). No trabalho de retrofit do manipulador foram listadas suas principais fontes de erro de posicionamento entre elas, o torque insuficiente nas juntas do manipulador, a inclinação se sua base, desalinhamento do efetuador terminal, correias e polias desgastadas e mal fixadas aos eixos da estrutura, desenhos incompletos da estrutura do manipulador e inexistência de instruções de manutenção do robô.

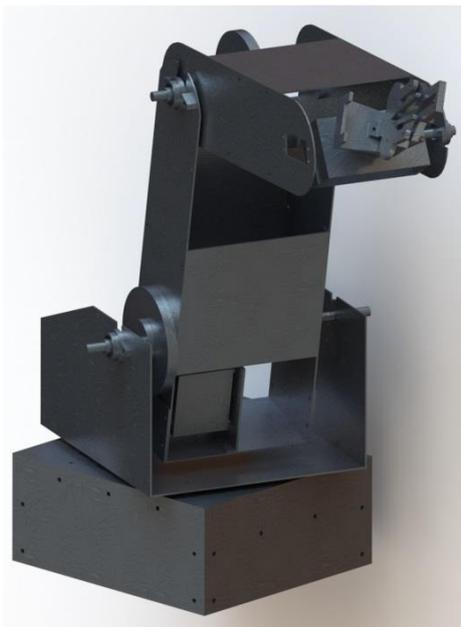


Figura 3.10 Manipulador projetado (Reis, 2015)

Para a solução dessas imperfeições no manipulador, foram atualizados os cálculos de inércia e torque nas juntas, bem como os métodos de redução e transmissão de movimento, sendo selecionado o sistema de redução com parafuso sem fim e coroa (Figura 2.13) para os eixos mais solicitados, tendo assim, a vantagem do travamento natural dessas juntas na ausência de movimento dos atuadores. Além disso, nas demais juntas foi implementado o uso de polias e correias dentadas como forma de transmissão (Figura 2.15), atualizado o sistema de contrabalanceamento por molas e melhorada a rigidez da base do manipulador. Com essa atualização o manipulador ficou como mostrado na Figura (3.11), onde se pode constatar a adição de rigidez a estrutura e uma maior documentação do projeto. O retrofit mecânico teve um custo final de R\$ 240,00 como é mostrado por Furtado (2017).

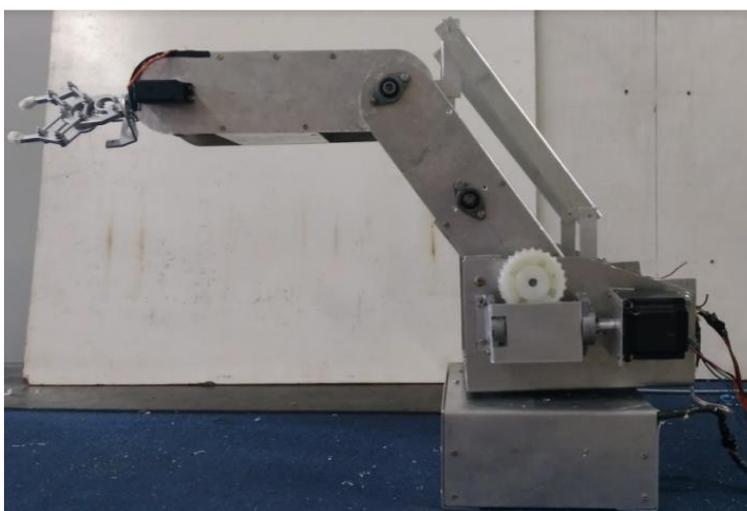


Figura 3.11 Resultado do retrofit do manipulador (Furtado, 2017)

3.3 PROJETOS ACADÊMICOS

Durante a fase de levantamento do estado da arte, foram pesquisados também projetos acadêmicos de outras universidades, de forma a se obter um conjunto de melhores práticas e formas construtivas com o propósito de se gerar a melhor solução possível. Dessa forma são listados abaixo os projetos que apresentam dados e características mais relevantes ao projeto do manipulador.

3.3.1 Manipulador FUM SCARA

Projeto desenvolvido por alunos da universidade de Mashhad no Irã, buscando o desenvolvimento de um manipular SCARA industrial e econômico para fins acadêmicos (Figura 3.12). Para a definição dos parâmetros foi realizado um processo iterativo para o projeto, começando com as estimativas de comprimento e peso dos componentes bem como os atuadores necessários e suas respectivas taxas de redução, dessa forma foi realizada a análise repetidamente até se obter parâmetros que combinassem entre si, o fluxograma da análise segue na Figura (3.13).



Figura 3.12 Manipulador FUM SCARA(Shariatee,2014)

Como solução para o manipulador foram usados motores DC com mecanismo de redução, sendo esse conjunto posicionado na junta do manipulador. Um dos pontos interessantes do projeto deste manipulador em comparação com os mostrados na Seção 3.2, é o estudo da composição das juntas de forma a otimizar a construção e garantir a rigidez mínima da montagem. Dessa forma o projeto define a formação da primeira junta como um eixo duplamente apoiado para maior resistência a momentos de flexão devido ao peso do manipulador. Assim como a maioria dos manipuladores industriais, o Fum Scara tem seu acionamento prismático na extremidade do manipulador, e é acionado por um sistema de colar e parafuso de potência com guia estriada, como pode ser visto na Figura (3.14). Por fim, o Fum Scara apresenta excelentes resultados de precisão e repetibilidade, como mostra a onde ele é comparado com manipuladores industriais disponíveis no mercado.

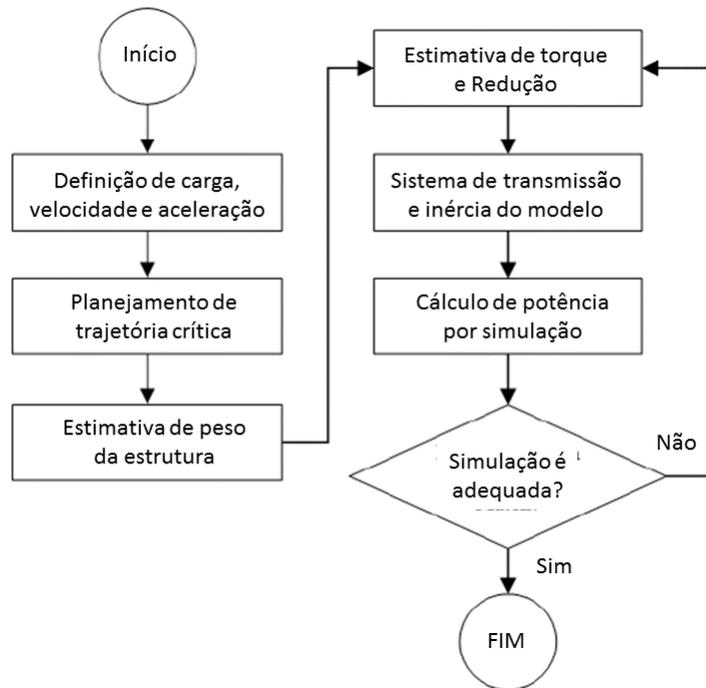


Figura 3.13 Fluxograma de projeto da estrutura FUM SCARA (Shariatee,2014)

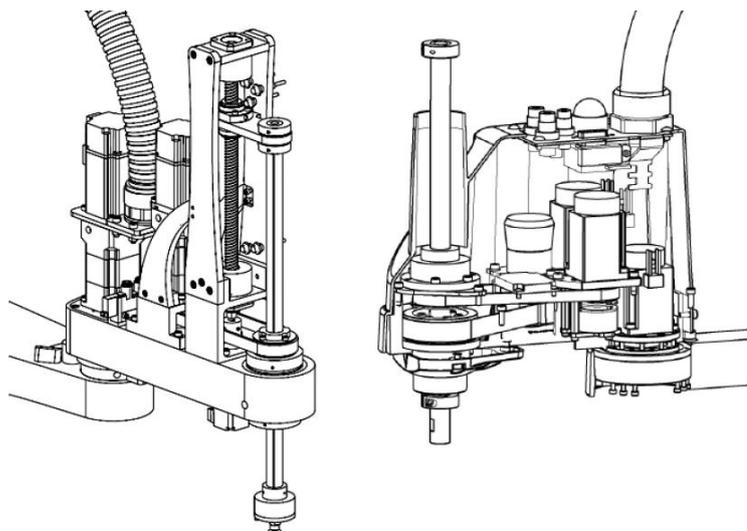


Figura 3.14 Mecanismo de acionamento da junta prismática (Shariatee,2014)

Especificação	Units	FUM SCARA	Epson LS6	Yamaha YK700XG	Adept Cobra s800
Alcance	mm	700	600	700	800
Velocidade linear	J1+J2 (mm/s)	8500	6800	8400	-
	3/(mm/s)	1100	1100	2300	1100
Repetibilidade	J4(°/s)	1100	2000	1020	1200
	x,y (mm)	±0.013	±0.02	±0.02	±0.017
	z (mm)	±0.023	±0.01	±0.01	±0.003
Carga de trabalho	α (°)	±0.016	±0.01	±0.005	±0.019
	(kg)	6	6	20	5.5

Figura 3.15 Resultados comparativos manipulador FUM SCARA (Shariatee,2014)

3.3.2 Manipulador SCARA – Universidade da Malásia

Neste projeto, inicialmente foi desenvolvido um fluxograma composto por fases de definição de requisitos, desenvolvimento de solução, projeto e construção do produto e, por fim realização de testes. Dentre os requisitos estão repetibilidade de 0,1 mm, peso máximo de 15 kg e carga de trabalho de até 1 kg. Assim, os requisitos foram então classificados com o uso de uma matriz de decisão de forma a guiar o desenvolvimento do manipulador. Dessa forma se seguiu com a análise dinâmica e cálculo de acelerações e torques necessários ao robô, com eles foram geradas as geometrias dos componentes que passaram por análise de elementos finitos para a validação do seu funcionamento. Gerando assim, o modelo mostrado na Figura (3.16), com raio de alcance de 520 mm e atuadores nas juntas. Após a realização de testes foram obtidos resultados de posicionamento com erros de posicionamento de até 10°, a ordem de grandeza do erro é atribuída a grande inércia dos elos do manipulador (feitos de barra de alumínio maciço) que dificulta o controle devido a grande inércia, e ao tempo de resposta do controlador que reduz a precisão de posicionamento conforme Sahari (2010).



Figura 3.16 Manipulador Universidade da Malaysia (Sahari, 2011)

3.3.3 Manipulador SCARA, Instituto Federal de Educação – Pernambuco

Neste projeto, foi desenvolvido um manipulador SCARA com 4 graus de liberdade, com o propósito de integração em uma célula de manufatura, dessa forma o primeiro grau de liberdade do manipulador foi alterado para corresponder a um deslocamento prismático, ampliando assim o volume de trabalho do manipulador. Todo o manipulador foi desenvolvido com o uso de perfis de alumínio, tanto links como juntas, onde os atuadores (nesse caso motores de passo) foram posicionados diretamente nas juntas. Para o método de movimentação no eixo z do manipulador, visando sua alta velocidade de deslocamento, foi usado um mecanismo com base na transmissão do movimento por correia. A O

modelo construído apresentou, segundo Neto (2015), erros de posicionamento de até **0,2 mm**. Foi apresentada também uma estimativa de custo da fabricação do manipulador, totalizando cerca de \$ 615,00. O modelo construído é mostrado na Figura (3.17).



Figura 3.17 Modelo de manipulador desenvolvido (Neto, 2015)

3.4 ELOS E SUAS FORMAS CONSTRUTIVAS

Um dos componentes mais importantes para a garantia da rigidez e precisão de posicionamento do manipulador são seus elos, para a morfologia SCARA eles são de extrema importância pois o comprimento e peso dos mesmos pode afetar muito na deflexão vertical do manipulador e o torque requerido para a movimentação, sendo assim é importante a revisão das formas construtivas dos links adotados pelos projetos mais atuais, afim de selecionar a melhor geometria com relação a peso e rigidez do componente.

Estrutura de barras: Comumente usada em finalidades estruturais com necessidade de redução de peso da montagem, oferece os benefícios de redução do peso e quando bem montada deflexão razoavelmente reduzida para aplicação em links de manipuladores, não é uma das morfologias de links mais usadas por apresentar um maior custo de fabricação e montagem. Um exemplo de emprego dessa geometria é apresentado na Figura (3.18).



Figura 3.18 Manipulador SCARA com links de estrutura de barras (RepRap, 2018)

Tubos pré-fabricados: Apresentam boa uniformidade geométrica e estão disponíveis em diferentes formatos, o que facilita a seleção da espessura e geometria adequada para o esforço aplicado. Por se tratarem de tubos já comerciais são facilmente encontrados e apresentam menor custo em relação aos demais em relação fabricação. Exemplos de aplicação podem ser observados no modelo (Figura 3.2) desenvolvido por Melo (2016) e no modelo da fabricante Hebi Robotics (Tabela 4.3).

União de chapas: Outra forma analisada foi a de união de placas. Com benefício de modificar a seção resistente de acordo com o esforço solicitado se demonstra uma forma de reduzir o peso dos elos do manipulador muito eficiente, porém há o inconveniente de que a montagem e fixação das placas seja feita com precisão para não causar erros geométricos no link do manipulador. Exemplos de manipuladores que usam desse método de construção são o manipulador desenvolvido por Reis (2015) e os manipuladores da fabricante Interbotix Labs (Widow X e XL), apresentados na Tabela (4.3).

Elos maciços: Uma forma construtiva comum em manipuladores industriais que permite aumentar a rigidez do componente, gerando porém maior inércia de movimentação e assim atuadores mais potentes e caros, exemplos e aplicação são o manipulador Fum SCARA (Figura 3.12) e o desenvolvido pela universidade da Malásia (Figura 3.16).

4 PROJETO INFORMACIONAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais características e condições de contorno levantadas para o desenvolvimento do presente projeto, de forma a listar as necessidades relatadas pelo usuário, as suas reais expectativas e definir uma priorização dos vários requisitos do projeto.

4.1 LEVANTAMENTO DE NECESSIDADES

Durante a revisão do estado da arte, foram levantadas as características e necessidades de um manipulador didático, tanto analisando projetos já realizados como consultando usuários de manipuladores, juntamente com essas informações, foi implementada a ferramenta de desdobramento de cenas como apresentado por Cheng (2010), onde se busca analisar possíveis situações de uso, se questionando quem, como, onde e porque será usado o produto, buscando assim um bom levantamento das necessidades do projeto. As necessidades obtidas foram então avaliadas por professores, técnicos e alunos de engenharia, onde foram atribuídas pontuações de 1 a 5 para a priorização das necessidades mais relevantes. Dentre as necessidades gerais listadas pelos usuários estão **custo reduzido**, visto que um dos fatores que distanciam o contato do aluno com tais manipuladores é o valor comercial deles, **escala reduzida** para possibilitar o uso em uma sala de aula ou em laboratórios dentro da universidade, **manipulador de fácil acionamento** já que seria em sua maioria usado por estudantes no processo de aprendizagem, **fácil transporte** para a utilização em diferentes locais de ensino, **manutenção simplificada e de baixo custo** pois uma das barreiras para a aplicação de tais manipuladores no ambiente acadêmico é a manutenção especializada e seu alto custo, **boa exatidão e repetibilidade** a fim de proporcionar o efetivo cumprimento de tarefas de montagem, e **estrutura rígida** para que mantenha a precisão ao movimentar a carga. Estas necessidades foram destrinchadas com o auxílio da metodologia de cenários buscando traduzir as reais necessidades do projeto com os questionamentos acima listados. As necessidades então obtidas foram listadas e agrupadas em classificações que melhor exemplificam sua natureza. As necessidades obtidas estão na Tabela (4.1) juntamente com as respectivas médias de avaliação.

Tabela 4.1 Organização das necessidades

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Avaliação: 1 a 5 1 - Pouco importante 5 - Muito importante
Custo	Acessibilidade	Uso de componentes comerciais	5
		Uso de peças presentes no comércio local	2
		Uso de materiais comuns	2
		Uso de peças comuns a outros equipamentos	3
	Mão de obra	Fabricação na universidade	5
		Mão de obra disponível	5
		Uso de oficinas da região	2
		Manutenção executada por uma pessoa	3
Reposição	Peças sobressalentes acessíveis	4	
	Materiais baratos	5	
Praticidade	Educativo	Permitir visualização dos mecanismos	4
		Tamanho compatível com bancada	3
		Plataforma open source (Controlador)	5
	Locomoção	Transportável por uma pessoa	2
		Estável ao transportar	4
		Transporte sem machucar	4
		Rápido preparo para transporte	2
		Manipulador leve	3
Tamanho adequado as entradas dos ambientes	3		
Precisão	Rigidez	Mantém integridade no transporte	5
		Baixa vibração da estrutura	5
		Minimização das folgas	5
		Balanceamento da posição dos motores	4
	Acionamento	Encaixe adaptável de E.T. (possível troca)	5
		Uso de malha fechada (Maior precisão)	5
		Precisão Milimétrica	5
		Área de trabalho milimétrica	5
Segurança	Evitar choques mecânicos (Choque entre elos)	3	
	Boa aderência as mãos	2	
	Ausência de partes cortantes	5	
	Evitar descarga elétrica acidental	4	
	Sem fios expostos (Segurança e estética)	2	
	Botão de parada	2	
Estrutura	Resistente a flexão	5	
	Resistente a torção	5	
	Resistente a impactos	4	
Manutenção	Acesso aos desenhos de montagem (manutenção)	5	
	Uso de poucas ferramentas (manutenção)	4	
	Ferramentas a disposição (próximas ao robô)	2	
	Lista de itens a serem checados (na manutenção)	5	

4.2 ANÁLISE DE MERCADO

Foi realizada então a análise de mercado para a obtenção dos parâmetros construtivos dos manipuladores disponíveis comercialmente e desenvolvidos dentro de universidades. Nessa etapa notou-se a baixa disponibilidade de informação sobre o desempenho de alguns manipuladores didáticos, sendo assim foram inseridos alguns manipuladores industriais de pequeno porte na análise dos parâmetros

construtivos. Na Tabela (4.2) estão presentes os manipuladores SCARA analisados e seus parâmetros construtivos e econômicos.

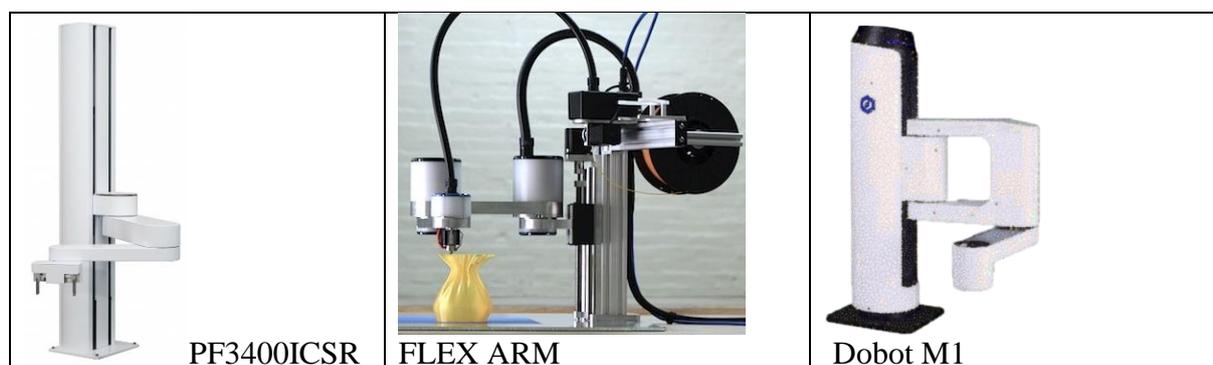
Tabela 4.2 Análise de mercado

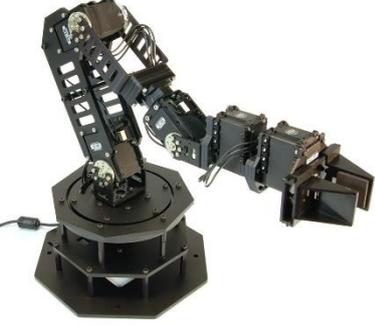
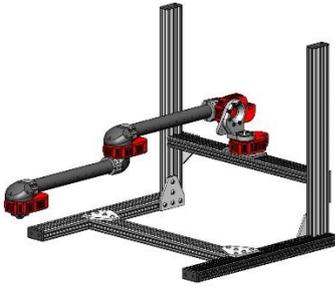
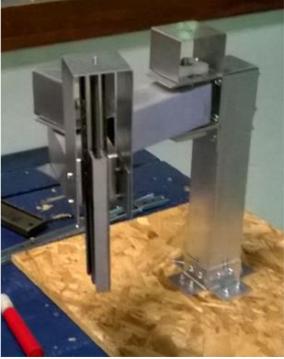
Fabricante	Modelo	Raio de ação		Repetitividade		Eixos	Carga (Kg)	Atuadores	Peso (kg)	Velocidade máxima		Custo
		X-Y (mm)	Z (mm)	X-Y (mm)	Z (mm)					X-Y (mm/s)	Z (mm/s)	
Precise Automation	PF34400 ICSR	660	400	0.05	0.05	4	1	Motor DC	20	1500	500	-
Flux Integration	FLX.ARM.S16.Z8	406	254	0.025	0.025	4	4,5	Motor de passo	-	500	200	\$1999
Dobot	Dobot M1	400	250	0.02	0.02	4	1,5	-	-	2000	800	\$1599
-	FUM SCARA	700		0.013	0.023	4	6	Motor DC	-	8500	1100	-
RobotDigg	Scara Servo	600	200	0.02	0.05	4	-	-	23	5000	1000	\$2999
Dobot	DOBOT Magician	320	-	0.2	-	4	0,5	-	3,4	320°/s	-	\$1499
Makerarm	Makerarm	400	254	0.025	0.044	4	1	-	8,1	-	-	\$2400
InterbotiX Labs	WidowX Robot Arm Kit	370	-	-	-	6	0,4	Servo motor	1,3	-	-	\$1700
InterbotiX Labs	WidowXL Robot Arm Kit	370	-	-	-	6	0,5	Servo motor	1,5	-	-	\$2195
robotdigg	4 Axis Scara Arm Robot	700	-	-	-	4	2	Motor de passo	7,5	-	-	\$698
Hebi robotics	4-DOF SCARA ARM KIT	650	-	-	-	4	1		2,5	192°/s	-	\$14900

É possível notar que a repetibilidade e velocidade dos manipuladores industriais são bastante restritas, de forma que os parâmetros levantados não são tidos como objetivos a serem alcançados, mas sim como uma base de comparação para os resultados obtidos ao fim do projeto. Vale ressaltar também que a maioria dos manipuladores industriais levantados são robôs colaborativos usados para realização de menores tarefas junto ao ser humano apresentando elevado custo se comparados a modelos didáticos.

Seguem representados na Tabela (4.3) os modelos de manipuladores consultados, observa-se uma tendência entre os manipuladores didáticos e comerciais de baixa carga com relação a movimentação prismática na base. Os manipuladores mostrados foram consultados nas referências, Precise automation (2018), Robotdigg(2018), Hebi robotics (2018), Dobot (2018), Iterbotic labs (2018), Makerarm (2018), flux integration (2018), Rocha(2016) e Shariatee (2014).

Tabela 4.3 Manipuladores analisados



		
Fum SCARA	Scara Servo	Dobot Magician
		
Makerarm	Widow X	Widow XL
		
4 Axis Scara robot Arm	Hebi - 4DOF Scara arm	Scara - UNB

4.3 EXTRAÇÃO DE REQUISITOS

Para o desenvolvimento do projeto foi adotada a metodologia de QFD para a obtenção e classificação dos requisitos técnicos a serem contemplados no projeto. De posse das necessidades levantadas para o projeto (apresentadas na Tabela 4.1), elas foram organizadas em categorias maiores para posteriormente serem utilizadas na montagem da matriz de QFD que se encontra no **apêndice A**. Na matriz de QFD foram relacionadas as necessidades de projeto com os requisitos técnicos adotados, usando o critério de enumeração apresentado na Seção 2.1. Com as relações entre necessidades e

requisitos atribuídas, são calculados os pesos relativos, conforme a Eq.(15), e pesos absolutos ,conforme a Eq.(14), de cada requisito, para dessa forma se classificar os requisitos por nível de relevância para se alcançar a qualidade planejada. Seque na Figura (4.1) o resultado da matriz de QFD apresentando em um diagrama de Pareto, onde as barras representam o peso relativo de cada requisito e a curva representa a relevância acumulada dos parâmetros de forma a se extrair os requisitos responsáveis por atender a determinada porcentagem da qualidade do projeto.

$$P_a = \sum_1^n A_{eq} \cdot R_{cq(i)} \quad (14)$$

Onde A_{eq} representa a avaliação atribuída ao elemento da qualidade e $R_{cq(i)}$ a relação do elemento da qualidade com a i-ésima característica da qualidade.

$$P_r = \frac{P_a}{\sum P_a} \quad (15)$$

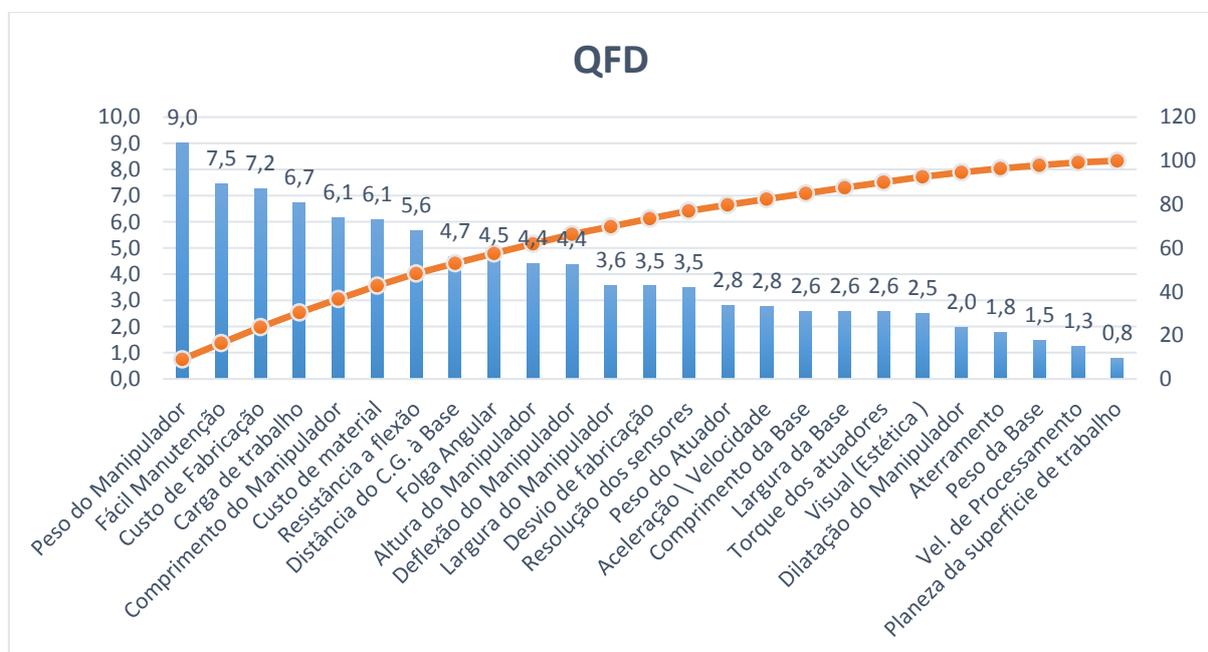


Figura 4.1 Diagrama de Pareto para análise de QFD (Elaborada pelo autor)

Com a união dos resultados da análise de QFD e os dados levantados na análise de mercado, pode-se então estabelecer a prioridade de cada um dos requisitos que foram definidos, e seus limites de variação para o atendimento da qualidade. Os limites das variáveis de medição dos requisitos foram atribuídos de forma qualitativa de acordo com a compatibilidade dos mesmos e o julgamento do autor embasado nos dados de mercado e na experiência prática de técnicos da área que foram consultados. A Tabela (4.4) apresenta a classificação dos requisitos e seus valores de interesse.

Tabela 4.4 Classificação de requisitos

Classificação dos Requisitos				
Ordem de prioridade	Requisito Técnico	Objetivo	Intervalo de consulta	Sensor
1°	Peso do Manipulador	< 25Kg	1,3 – 23 kg	Balança
2°	Fácil Manutenção	< 5h	-	Relógio
3°	Custo de Fabricação	< R\$1500	-	R\$
4°	Carga de trabalho	400g	0,4 – 6 kg	Cálculo
5°	Comprimento do Manipulador	400 mm	320 – 700 mm	Régua
6°	Custo de material	< R\$1500	-	R\$
7°	Resistência a flexão	-	-	-
8°	Distância do C.G. à Base	< 200mm	-	Cálculo
9°	Folga Angular	< 30"	-	Projeto
10°	Altura do Manipulador	< 400mm	200 – 600 mm	Régua
11°	Deflexão do Manipulador	< 1mm	-	Cálculo
12°	Largura do Manipulador	-	-	Régua
13°	Desvio de fabricação	-	-	Paquímetro
14°	Resolução dos sensores	500 pul/ver	-	Especificação
15°	Peso do Atuador	< 1,5kg	0,2 – 1.5 kg	Balança
16°	Aceleração \ Velocidade	< 500mm/s	500 – 8500 mm/s	Cálculo
17°	Comprimento da Base	<1m	-	Régua
18°	Largura da Base	<600mm	-	Régua
19°	Torque dos atuadores	-	-	Cálculo
20°	Visual (Estética)	Agradável	-	-
21°	Dilatação do Manipulador	-	-	-
22°	Aterramento	Sim	-	Voltímetro
23°	Peso da Base	<2Kg	-	Cálculo
24°	Vel. de Processamento	-	-	Especificação
25°	Planicidade da superfície de trabalho	± 0.1mm	-	Especificação

5 PROJETO CONCEITUAL

Este capítulo tem como objetivo a abordagem dos diferentes aspectos e funcionalidades do manipulador de forma a criar modelos de solução para o problema, dessa forma, elas então poderão ser avaliadas e classificadas para a final seleção do modelo de solução a ser implementado.

5.1 ANÁLISE POR MATRIZ MORFOLÓGICA

Para gerar soluções para um determinado problema se torna eficaz a divisão do projeto em blocos menores para os quais serão analisadas soluções parciais para cada um dos blocos formados. Esse método pode ser aplicado por meio de uma matriz morfológica onde inicialmente o projeto é discutido e são levantadas as principais funções que o produto final deve atender, com base nessas funções são então organizadas as categorias ou setores nos quais será subdividido o projeto. Com o projeto dividido em subproblemas o próximo passo é a geração de soluções parciais que atendam ao problema analisado. Para uma análise com bons resultados é recomendado que se sugira duas ou mais soluções para cada um dos blocos formados. Com base nessa metodologia de abordagem do projeto foi montada a Tabela (5.1) onde são apresentadas as principais categorias (preenchidas em fundo cinza) e na coluna mais à direita as soluções selecionadas.

Tabela 5.1 Matriz morfológica do manipulador

Matriz morfológica			
Projeto Mecânico	Fabricação	Manufatura Aditiva	
		Usinagem de Tarugos e Placas	
	Base estática	Material	Alumínio
			Madeira
		Fixação	Polímero
			Fixação com rebites
	Material da base de trabalho	Soldagem	
		Fixação com Parafusos	
		Placa de madeira	
		Placa de polímero	
		Placa de alumínio	
		Fixação com rebites	
	Links	Fixação	Soldagem
			Fixação com Parafusos
		Material	Metal
			Combinação metal/ polímero
		Estrutura (SCARA)	Polímero
			Placas
			Treliça
			Tubos
Juntas	Material	Metal	
		Combinação metal/ polímero	
	Deslizamento	Polímero	
		Buchas	
	Movimento Vertical	Rolamentos	
Movimento Prismático	Descida da ponta		
		Descida da base	
		Correia interrompida	

		Transmissão	Pinhão cremalheira
			Barra roscada
			Parafuso de potencia
		Redução	Cabos ou barras
			Polia correia
			Engrenagens
			Sem fim coroa
		Acoplamento	Red. Harmônico
			Redutor Planetário
			Flexível
		Encaixe do E. Terminal	Rígido
			Parafusado
			Cônico
		Posição do Atuador	Magnético
			Nos elos
Deslocados para a base			
Projeto Eletrônico	Atuador	Motor DC	
		Motor AC	
		Motor de Passo	
Sensor	Encoder absoluto		
	Resolver		
	Encoder relativo e fim de curso		

Na análise do estado da arte foi possível verificar diversas configurações de robôs manipuladores que variam desde o tipo de links até a método de acionamento. Para que seja realizada uma otimização de características, buscando se obter a melhor relação custo/ precisão, foi usada a ferramenta de matriz de decisão para cada um dos parâmetros levantados na matriz morfológica anteriormente apresentada. Para as matrizes, foram escolhidos os seguintes parâmetros de avaliação, apresentados na Tabela (5.2), e os respectivos pesos que foram obtidos a partir da matriz de QFD.

Tabela 5.2 Parâmetros de avaliação

Parâmetro de avaliação	Baixo Custo	Maior Rigidez	Possibilidade de Fabricação	Baixo Peso	Maior Durabilidade
Peso	2	3	2	1	2

5.1.1 Análise de material

A questão de escolha do material de fabricação do manipulador se divide em três principais categorias, seriam elas, a escolha de material dos elos, a escolha do material para as juntas do braço e para a estrutura estática de suporte. Na escolha do material dos links deve-se prezar por materiais rígidos que apresentem baixa deflexão quando carregados sob flexão, pois o comprimento dos links torna a deflexão final mais evidente. Ao mesmo tempo os links devem ser leves para a redução da inércia do manipulador que impacta na robustez dos atuadores.

Na escolha do material para os elos do manipulador também existe a preocupação quanto a rigidez das juntas, pois por se tratar de uma união entre elementos com movimento relativo (links) se torna difícil a eliminação da folga que prejudica o paralelismo entre os eixos rotacionais do manipulador.

Para o material da estrutura da base estática e superfície de trabalho, há preocupação com relação a rigidez pois ela é a responsável por manter a conexão entre as partes móveis e o volume de trabalho do manipulador, porém sem grande restrição em relação ao peso da estrutura, visto que por se tratar de um componente estático ele não impacta no torque necessário nos atuadores.

A maioria dos robôs manipuladores industriais analisados são construídos com o uso de aço nas peças estáticas e de alumínio puro ou liga endurecida de alumínio nas peças móveis. Os robôs didáticos, por apresentarem peso e carga de trabalho inferiores, optam por materiais mais leves e baratos como polímeros pré-fabricados (pvc, acrílico, abs, poliamida 6.0, entre outros) em formato de chapas e tarugos, ou por peças poliméricas obtidas por manufatura aditiva. A maioria dos manipuladores didáticos combinam esses materiais para obter uma melhor relação entre rigidez e peso do manipulador. O uso de metais como alumínio aumenta a rigidez do manipulador, porém acrescenta maior inércia, fazendo necessário o uso de atuadores de maior potência, e ainda são materiais de maior custo e de fabricação mais especializada. O uso de polímeros pré-fabricados beneficia a diminuição da inércia do manipulador, mas apresentam maior flexibilidade em relação aos metais, reduzindo a rigidez da estrutura do manipulador.

Com os fatores apresentados na Tabela (5.2), foram montadas as matrizes de decisão para escolha dos materiais dos links, das juntas, da base estática e da base de trabalho. Para isso foram consultadas densidade, módulo de elasticidade e custo de cada material apresentado. As matrizes de decisão seguem nas Tabelas (5.3) a (5.6) e os dados levantados na Tabela (5.7).

Tabela 5.3 Seleção de material para os Links

Escolha de Material dos Links						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Alumínio	2	5	3	2	5	3,7
Polímero	3	3	3	2	4	3,1
ABS Prot. Rápida	4	3	5	5	2	3,6

Tabela 5.4 Seleção de material para as juntas

Escolha Material Juntas						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Alumínio	2	4	3	3	5	3,5
Polímero	4	2	4	4	4	3,4
Polímero e Alumínio	4	4	4	4	4	4,0

Tabela 5.5 Seleção de material para a base

Escolha do Material da Base						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Alumínio	3	5	3	3	5	4,2
Madeira	4	3	5	3	2	3,4
Polímero	4	3	4	4	4	3,7
Alumínio e polímero	3	4	4	3	5	3,9

Tabela 5.6 Seleção de material para a superfície de trabalho

Escolha Material Placa base						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Placa de Madeira	4	4	5	4	4	4,2
Placa de alumínio	3	5	4	2	5	4,1
Placa de Polímero	3	4	5	3	4	3,9

Tabela 5.7 Dados de material consultados

Parâmetros Consultados		
Material	Mod. de Elasticidade(MPa)	Densidade(g/cm3)
Alumínio	70000	2,7
Teflon	700	2,2
PVC	3100	1,47
Poliamida 6.0	3000	1,14
Acrílico	2900	1,18
ABS Prot. Rápida	2070	1,1
Madeira (MDF)	-	0,85

5.1.2 Análise da geometria dos links

Outro fator que influencia bastante na redução do peso e da deflexão do manipulador é o formato de seção do link que podem apresentar seção sólida ou seções vazadas como as obtidas pelo uso de perfis vazados ou pela união de chapas para melhorar a relação entre resistência e peso.

Quanto ao formato dos links, as opções selecionadas foram escolhidas com base nos modelos analisados durante a revisão do estado da arte.

Não foi considerado o uso de links maciços de alumínio tanto pelo fato de encarecer o projeto do manipulador e gerar a necessidade de atuadores mais potentes, o que não se encaixaria bem em um projeto de baixo custo para aplicações didáticas.

Assim foi montada a matriz de decisão mostrada na Tabela (5.8).

Tabela 5.8 Seleção para geometria dos links

Parâmetro	Estrutura dos Links					Total
	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Estrutura de barras	3	4	2	5	4	3,5
União de Placas	4	3	3	3	3	3,2
Link Tubular	5	5	5	4	4	4,7

5.1.3 Análise do método construtivo

Para a construção do manipulador de forma geral foram analisadas as seguintes maneiras, de acordo com a possibilidade de realização interna a universidade, com o intuito de reduzir os custos.

Manufatura aditiva: Na atualidade, a popularização de máquinas de prototipagem rápida com preços acessíveis tem crescido surpreendentemente, o que levanta a possibilidade de fabricação de peças, principalmente poliméricas, sob medida para projetos sem a necessidade de equipamentos grandes e robustos. Contudo a fabricação por manufatura aditiva ainda enfrenta algumas dificuldades de implementação no sentido de serem usadas como componentes de máquinas, pois a resistência da peça é fortemente influenciada pelas configurações e orientações de fabricação. Ainda assim durante a revisão do estado da arte, foi verificado que a maioria dos manipuladores didáticos usam de peças fabricadas com manufatura aditiva como forma de reduzir os custos, já que para fins didáticos, os manipuladores não necessitam de robustez elevada, nem suportam elevadas cargas de trabalho. Exemplos de manipuladores fabricados em manufatura aditiva estão na Figura (5.1).



Figura 5.1 Manipulador SCARA fabricado em manufatura aditiva (JJROBOTS, 2018)

Usinagem de placas e tarugos: A usinagem de placas e tarugos é uma das formas mais convencionais de fabricação, com esse método se consegue resultados excelentes e com tolerâncias apertadas, porém se mostra um processo caro para a fabricação de protótipos ou máquinas que não serão comercializadas em grande escala, além disso o acesso a esse tipo de máquina deve ser realizado por um técnico operador experiente que também agrega custo ao método de fabricação. Um exemplo de manipulador fabricado com usinagem de placas e tarugos é apresentado na Figura (5.2).



Figura 5.2 Manipulador fabricado por usinagem de placas (TZT, 2018)

Dessa forma foi montada a Tabela (5.9).

Tabela 5.9 Análise do método de fabricação

Parâmetro	Escolha do Método de Fabricação					Total
	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Manufatura Aditiva	4	3	5	5	3	3,8
Usinagem de Tarugos e placas	3	5	4	3	5	4,2

5.1.4 Análise da Fixação do manipulador

Uma característica muito importante a ser definida também é a forma de fixação do manipulador, que impacta na rigidez do mesmo, na praticidade da manutenção, na durabilidade dos elementos, dentre outros aspectos. Analisando a construção de manipuladores na atualidade foram levantados os seguintes métodos de união mais usuais:

Rebitamento: Por se tratar de um método de união permanente impossibilita a desmontagem do conjunto sem que seja inutilizado como elemento de fixação, porém ainda assim permite a desmontagem para manutenção. Rebites também podem ser aplicados na montagem de treliças que é uma forma de construção com boa relação entre peso e resistência. Por fim a aplicação de rebites reduz o custo de

fabricação e o peso da estrutura, porém aumenta o custo de manutenção vista a reposição dos mesmo em caso de desmontagem e a necessidade de habilidade técnica para um bom rebitemento.

Soldagem: Sendo um processo de união permanente de alta rigidez quando bem executado, garante ao conjunto excelente fixação e reduz a folga para zero entre os componentes montados. Por ser um processo realizado com a fusão de metais ele altera as propriedades dos mesmos dentro de uma zona termicamente afetada, além disso, o resfriamento dos metais fundidos gera uma retração também conhecida como repuxo que altera as relações geométricas entre os componentes da união o que pode gerar erros de perpendicularidade e concentricidade entre furos e superfícies se não for bem executada.

União parafusada: Um dos métodos mais empregados na união de componentes, tem a vantagem de se tratar de um método de união não permanente que facilita a manutenção da estrutura e possibilita a troca de um determinado componente sem danos aos demais. Devido a folga entre furos diâmetro do parafuso, necessária para evitar danos a geometria da rosca não se recomenda usa-los como guias para a fixação de junções, para isso juntamente costuma-se adotar uma geometria que guie o encaixe ou uso de pinos para posicionar as peças precisamente.

Com base na análise da construção de manipuladores e com as informações obtidas nas referências Budynas (2008) e Norton (2013) foi montada a Tabela (5.10) e a Tabela 5.11(5.11) para análise do método de fixação dos links do manipulador e da base onde o braço articulado será montado.

Tabela 5.10 Análise de fixação dos links

Escolha de Fixação dos Links						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Fixação com rebites	5	2	5	4	2	3,4
União com solda	2	5	3	3	4	3,6
Fixação com parafusos	4	3	5	4	5	4,1

Tabela 5.11 Análise de fixação da base

Escolha Fixação da Base						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Rebites	5	3	4	4	2	3,5
Soldagem	3	5	2	3	5	3,8
Parafusada	4	4	4	4	5	4,2

5.1.5 Método de deslizamento das juntas

Para a escolha do método de deslizamento das juntas foram analisadas a possibilidade de mancais de deslizamento e de uso de mancais de rolamento para garantir o baixo atrito na movimentação da estrutura do manipulador. O uso de mancais de deslizamento acompanha os benefícios de tamanho

compacto na direção radial e menores ruídos, vibrações e perdas por atrito quando comparados a rolamentos de esferas comumente usados. Apresentam porém as desvantagens de maior tamanho na direção axial, necessidade de manutenção do filme de lubrificante presente entre o eixo e a bucha/anel de deslizamento e a impossibilidade de admissão de cargas axiais. Os rolamentos, porém, apresentam as mais diversas construções entre as quais a maioria suporta tanto cargas radiais como axiais e estão disponíveis amplamente para compra no mercado, já as buchas de mancais de deslizamento precisam ser usinadas nas medidas específicas do projeto. A Tabela (5.12) mostra a matriz de decisão montada para a seleção do método de deslizamento.

Tabela 5.12 Matriz de decisão método de deslizamento

Escolha Deslizamento de juntas						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Buchas poliméricas	4	3	3	5	3	3,4
Buchas metálicas	3	4	2	4	4	3,4
Rolamentos	3	5	5	3	5	4,4

5.1.6 Movimentação vertical

O primeiro manipulador SCARA desenvolvido pelo professor Hiroshi Makino tinha em sua morfologia o uso da junta prismática posicionada na extremidade móvel do braço manipulador, e essa configuração se tornou muito comum com a disseminação da morfologia SCARA, assim como pode-se ver em manipuladores industriais. Atualmente, porém com o maior desenvolvimento de manipuladores didáticos que não necessitam mover cargas tão grandes há um crescimento de uma geometria que propõe a elevação da carga por meio da subida de todo o braço. Essa morfologia tem se mostrado muito eficaz para aplicações como manufatura aditiva, corte a laser e *pick and place* para objetos de menor peso. A configuração convencional tem como benefícios o de redução da potência do atuador prismático, pois ele deve elevar apenas o peso do efetuador terminal, da carga e o seu próprio peso (a depender do método usado), já na morfologia de subida de todo o manipulador há a necessidade de subida de todos os elos e os demais componentes como reduções e atuadores que estejam fixos nos braços do manipulador, por isso se faz tão comum em manipuladores de menor carga que usam materiais mais leves e atuadores menos robustos. Uma das desvantagens do uso da subida de todo o braço seria a dificuldade de alcançar objetos em rebaixos com barreiras, mas isso poderia ser resolvido com um comprimento maior de garra, a depender da aplicação, já o modelo convencional tem como desvantagem o acúmulo de peso na extremidade do manipulador, que eleva a deflexão dos links e a potência dos atuadores rotacionais. Há ainda a possibilidade da combinação dos dois sistemas para se adicionar redundância ao manipulador, possibilitando assim um maior ajuste da altura do manipulador e mais facilidade em se contornar obstáculos, porém ele não apresenta grandes vantagens para o presente projeto devido ao custo de motores adicionais e aumento da complexidade da construção.

Tabela 5.13 Analise do movimento vertical

Escolha do movimento vertical						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Movimentação na ponta	5	3	4	4	4	3,9
Movimentação na Base	4	3	4	5	4	3,8
Movimentação Mista	2	2	3	1	2	2,1

5.1.7 Movimentação prismática

O princípio da movimentação prismática varia muito entre manipuladores, a maioria usa de dispositivos com parafuso de potência e barras guia para a elevação do efetuador terminal, alguns outros modelos usam de barras roscadas que embora a rosca não tenha uma geometria que favoreça a função, oferece bons resultados para pequenas cargas. Há ainda os que usam de um sistema de correia interrompida para a elevação e outros que usam um conjunto pinhão cremalheira que embora ofereça folga, se mostra efetivo de acordo com a aplicação do manipulador. Exemplos dos mecanismos de subida estão na Figura (3.14) e na Figura (5.2), e a matriz de decisão montada na Tabela (5.14)

Tabela 5.14 Matriz de decisão para a movimentação prismática

Movimentação Prismática						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Fuso de potencia	5	5	4	3	5	4,6
Pinhão cremalheira	3	3	4	5	4	3,6
Correia interrompida	3	4	5	5	4	4,1
Barra roscada	4	5	4	3	5	4,4

5.1.8 Sistema de transmissão

A depender da configuração do manipulador se faz necessária a utilização de transmissões tanto no intuito de reduzir movimento dos atuadores para as juntas como no de desloca-los para posições que favoreçam melhor a inércia do manipulador. Para a realização dessa transmissão pode-se usar sistemas de polias e correia sincronizadoras, com o desafio de mantê-las tencionadas, pode-se também usar transmissão por cabos ou barras que adicionam rigidez a transmissão, porém limitam o intervalo de movimento das juntas. Na revisão do estado da arte, são apresentados exemplos dessas transmissões e na Tabela (5.15) a matriz montada para a análise do mecanismo de transmissão.

Tabela 5.15 Analise da transmissão

Escolha da Transmissão						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Polia e correias	5	4	5	5	5	4,7
Transmissão por cabos	5	4	5	4	4	4,4
Transmissão por barras	4	5	4	3	5	4,4

5.1.9 Reduções

Vista a precisão, velocidade e torque de mercado dos motores de passo e motores DC mais comumente usados em robótica, há a necessidade tanto de aumento do torque quanto de redução da velocidade de movimentação dos elos para a facilidade de controle de tais atuadores. Para isso é comum o emprego de redutores entre o motor e a junta para a suavização dos movimentos e alcance do torque.

Trem de engrenagens: Muito empregados em sistemas de redução industriais para redução de motores trifásicos apresentam bom desempenho, porém de acordo com o número de engrenamentos podem se tornar volumosos e pesados. No caso de compra de tais reduções o custo seria elevado pois os modelos disponíveis no mercado são para aplicações de maior potência. Se projetados, a fabricação em metal os tornaria novamente caros devido ao custo de usinagem. Uma terceira opção seria a fabricação das engrenagens em material polimérico, com menor custo de fabricação.

Sistema de polias e correias: Se mostra uma excelente solução devido a redução da folga a quase zero, porém com a necessidade de se manter as correias tensionadas. Poderiam estas ser fabricadas em material polimérico (para redução do peso e do custo do conjunto) e selecionadas as correias com base em catálogos de fabricantes.

Parafuso sem fim Coroa: Se mostra uma solução favorável devido as altas taxas de redução em pequenos volumes, e possuem ainda a característica de auto travamento impossibilitando o movimento dos links sem o acionamento dos motores. Em contrapartida uma redução sem fim coroa sofre perdas por atrito e costuma ser banhada em lubrificante, além disso, a fabricação de parafusos sem fim é mais cara e complexa muitas vezes resultando em folga.

Redutor Harmônico: Por se tratar de redutores com alta taxa de redução e movimentos suaves com perdas reduzidas se torna atrativo principalmente com o uso de motores DC, porém devido ao custo elevado e a complexidade da construção não se torna uma opção prática em um projeto de baixo custo.

Redutor Planetário: Sendo um mecanismo de redução compacto se torna uma opção interessante, porém o custo de redutores comerciais não é compatível com a escala do projeto. Uma outra opção seria a fabricação de um redutor planetário com engrenagens poliméricas e eixos de metal, que baratearia a fabricação porém apresentariam volume maior em comparação com peças metálicas. Segue na Tabela (5.16) a análise do sistema de redução.

Tabela 5.16 Análise sistema de redução

Parâmetro	Escolha da Redução					Total
	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Polia e correias	5	4	5	4	4	4,4
Trens de engrenagens	3	4	4	4	3	3,6
Redutor planetário	3	4	3	4	4	3,6
Parafuso sem-fim coroa	1	5	3	3	3	3,2
Redutor Harmônico	1	5	2	3	5	3,4

5.1.10 Acoplamentos;

Os acoplamentos usados poderiam ser rígidos ou flexíveis. Os acoplamentos rígidos são construídos de maneira a manter contato rígido entre as duas partes, uma acoplada no eixo do equipamento e outra no eixo do motor, assim não há folga e nem deslizamento entre as partes, porém para sua montagem é necessário que se tenham tolerâncias mais apertadas de coaxialidade entre os eixos o que dificulta seu uso. Por outro lado, há os acoplamentos flexíveis que permitem pequenos desvios entre os eixos que podem ser compensados por elementos elásticos que unem ambos os eixos. Por se tratar de um manipulador didático e pelo fato das potências dos atuadores serem reduzidas há a possibilidade de se usar ambos, porém o uso de acoplamentos flexíveis foi uma das fontes de erro de Rocha (2016). Segue na Tabela (5.17) a análise para o acoplamento.

Tabela 5.17 Análise do acoplamento

Parâmetro	Escolha Acoplamento					Total
	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Rígido (seleção)	2	5	4	3	4	3,8
Flexível (seleção)	3	4	4	3	4	3,7

5.1.11 Atuadores

Para o projeto apenas foi analisado o uso de atuadores elétricos por questão de custo e volume do sistema, visto que sistemas pneumáticos ou hidráulicos estariam fora de questão pela necessidade de vedação e de compressores. Assim foram analisadas as seguintes possibilidades:

Motores de passo: Se destaca pela precisão angular de posicionamento devido ao deslocamento discreto do rotor, muito usados em manipuladores, permitem o controle de posicionamento inclusive em malha aberta desde que possuam torque suficiente para a aplicação, trabalham em velocidades reduzidas em comparação a motores DC o que diminui o grau de redução utilizado. Há, porém, o fato que ao serem acionados a baixas velocidades inserem vibração ao movimento do manipulador devido ao movimento discretizado do rotor.

Motor DC: Por apresentarem movimento contínuo permitem uma precisão maior que motores de passo a depender do sensor utilizado, pois estes não costumam ser controlados em sistema de malha aberta. Apresentam baixo torque e alta velocidade de rotação para a maioria dos modelos disponíveis no mercado, fazendo necessário o uso de reduções maiores para o alcance do torque necessário a aplicação.

Motor AC: Motores de corrente alternada síncronos (em que a velocidade de giro depende da frequência da tensão de alimentação) tem se mostrado nos últimos anos superiores a motores de corrente contínua com relação a dissipação de calor e a potência específica, podendo ainda ser controlado sem a necessidade um sensor externo, aproveitando-se o sensor de posição interno ao próprio motor. Contudo

demandam a alimentação a partir de uma fonte trifásica. Dessa forma, segue na Tabela (5.18) a análise dos atuadores.

Tabela 5.18 Analise dos atuadores

Escolha Atuadores						Total
Parâmetro	Custo	Precisão	Montagem	Peso	Confiabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Motor DC	4	5	4	3	5	4,4
Motor de Passo	4	4	5	4	4	4,2
Motor AC	3	4	2	3	4	3,3

5.1.12 Posição dos atuadores;

A posição dos atuadores é um dos fatores que mais impactam na inércia do manipulador e por consequência no torque necessário para movimentar o braço robótico. Durante o levantamento do estado da arte foram registradas três configurações convencionais mais comuns entre os manipuladores com morfologia SCARA, seriam eles:

Atuadores nas juntas: Esse tipo de posicionamento dos motores elimina a necessidade de transmissão do movimento, pois o atuador responsável pelo movimento de cada junta já está acoplado a mesma. Em contrapartida é um posicionamento que a depender do peso de cada um dos atuadores aumenta a inércia de movimentação do manipulador. Esse tipo de montagem pode ser visto no modelo FUM SCARA da referência Shariatee (2014) e em vários outros manipuladores industriais.

Atuadores deslocados para a base: Como uma opção para reduzir a inércia do manipulador o uso de atuadores junto a base que tem seu movimento transmitido até a junta abre também brecha para a implementação de redução durante a transmissão do movimento, tendo como desvantagem uma maior complexidade na montagem e o risco de inserir folga com a transmissão.

Atuador prismático na base: Outra forma de reduzir a inércia do manipulador é a remoção do atuador prismático da extremidade móvel do braço para que a elevação seja feita na base, assim se pode remover peso do ponto mais crítico para a inércia do manipulador, porém com a desvantagem de se elevar todo o braço do manipulador. Esta opção é uma das mais usadas nos manipuladores didáticos com morfologia SCARA analisados. Um exemplo dessa configuração é o da Figura (5.1).

Dessa forma foi montada na Tabela (5.19) a matriz de decisão sobre a posição dos atuadores.

Tabela 5.19 Analise da posição dos atuadores

Posição dos Atuadores						Total
Parâmetro	Custo	Rigidez	Fabricação	Peso	Durabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Nas Juntas	2	3	5	3	3	3,2
Deslocados da junta	4	4	4	4	4	4
Deslocadas para a Base	3	4	4	3	4	3,5

5.1.13 Sensores

Um dos fatores que mais impactam na precisão do manipulador é o tipo e a resolução do sensor utilizado, para o presente projeto foram analisadas as seguintes opções:

Encoder relativo: Por se tratar de um sensor com apenas duas fileiras de leitura isso simplifica seu uso e aumenta o número de ranhuras disponíveis em caso de encoder circular. Apresentam menor custo de mercado que os absolutos, porém com a necessidade de um outro sensor, como um fim de curso, para que o manipulador crie uma referência de limite de movimento.

Encoder absoluto: Se mostra atrativo pela robustez que dá ao sistema visto que o manipulador sempre sabe em que posição cada junta está, porém para uma mesma resolução apresenta custo superior ao encoder relativo.

Resolver: Por se tratar de um sensor de leitura analógica que mede o sinal de tensão em uma bobina que gira solidária ao eixo em comparação com uma outra fixa a estrutura, o resolver apresenta resolução, a princípio infinita, também propiciando uma leitura da posição absoluta da junta, porém é mais dificilmente encontrado no mercado.

Fim de curso: Sensores mais comuns empregados na área de automação podem apresentar acionamento mecânico com o fechamento de uma chave ou até mesmo óptico ao interromper o sinal captado por um receptor óptico. Se torna uma necessidade no caso de uso de sensores de posição não absolutos.

A matriz de decisão montada para escolha do tipo de sensor é apresentada na Tabela (5.20).

Tabela 5.20 Análise do sensor

Parâmetro	Escolha Sensor					Total
	Custo	Precisão	Montagem	Peso	Confiabilidade	
Peso	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	1
Encoder Relativo e Fim de curso	4	4	4	3	4	3,9
Encoder Absoluto	2	4	5	3	4	3,7
Resolver	1	5	4	3	5	3,8

Da combinação dos elementos da matriz morfológica podem ser geradas muitas combinações de soluções, de maneira que seria muito laborioso a análise de todas, para isso foram montadas três soluções combinando os melhores resultados das matrizes de decisão respeitando a compatibilidade dos componentes e da estrutura. As soluções estão apresentadas na Tabela (5.21)

Tabela 5.21 Parâmetros das soluções selecionadas

Parâmetro		Solução 1	Solução 2	Solução 3
Fabricação		Usinagem/ M. Aditiva	Manufatura Aditiva	Manufatura Aditiva
Base estática	Material	Alumínio	Alumínio e Polímero	Madeira
	Fixação	Parafusada	Parafusada	Parafusada
Material base de trabalho		Madeira	Madeira	Madeira
Links	Fixação	Parafusada	Parafusada	Parafusada
	Material	Alumínio	Alumínio	Polímero
	Estrutura	Tubular	Tubular	Treliça
Juntas	Material	Alumínio	Polímero	Polímero
	Deslizamento	Rolamentos	Rolamentos	Rolamentos
	Movimento Vertical	Na ponta	Na ponta	Na base
	Movimento Prismático	Parafuso de potência	Cremalheira	Parafuso de potencia
	Transmissão	Direta	Polias	Polias
	Redução	Trem Planetário	Polias e correias	Trem de engrenagens
	Acoplamento	Rígido	Rígido	Flexível
Posição do Atuador		Nas juntas	Deslocados	Deslocados
Atuador		Motor DC	Motor DC	Motor DC
Sensor		Encoder relativo	Encoder relativo	Encoder relativo

Foi dessa forma desenhado um esboço preliminar para cada uma das soluções, como mostram as Figura (5.3) a (5.5).

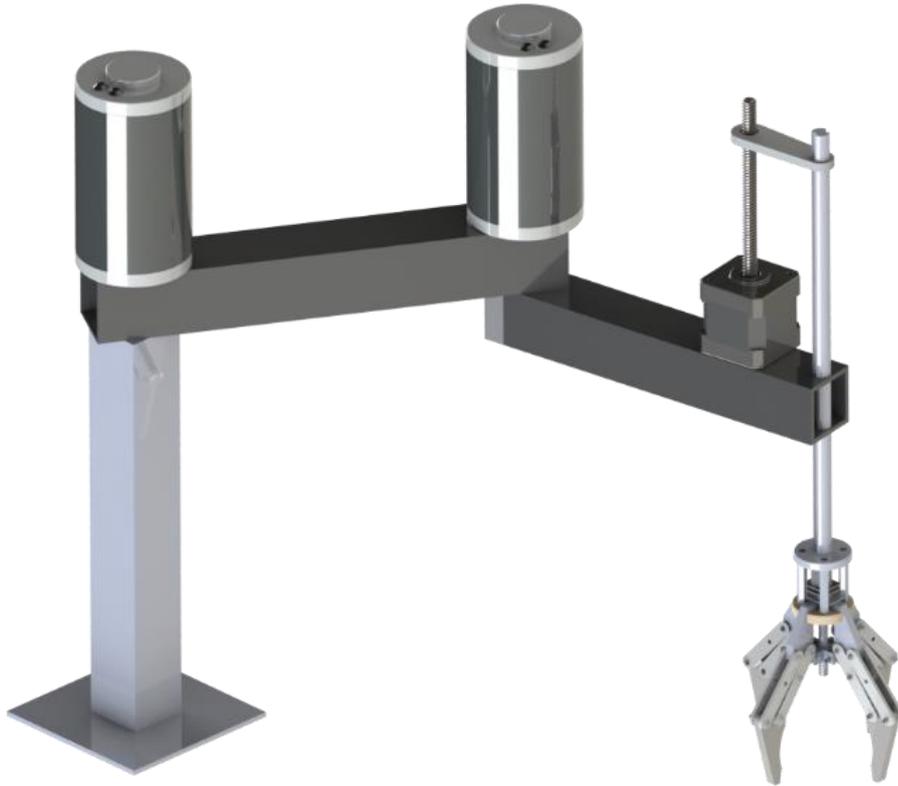


Figura 5.3 Esboço solução 1 (Elaborada pelo autor)

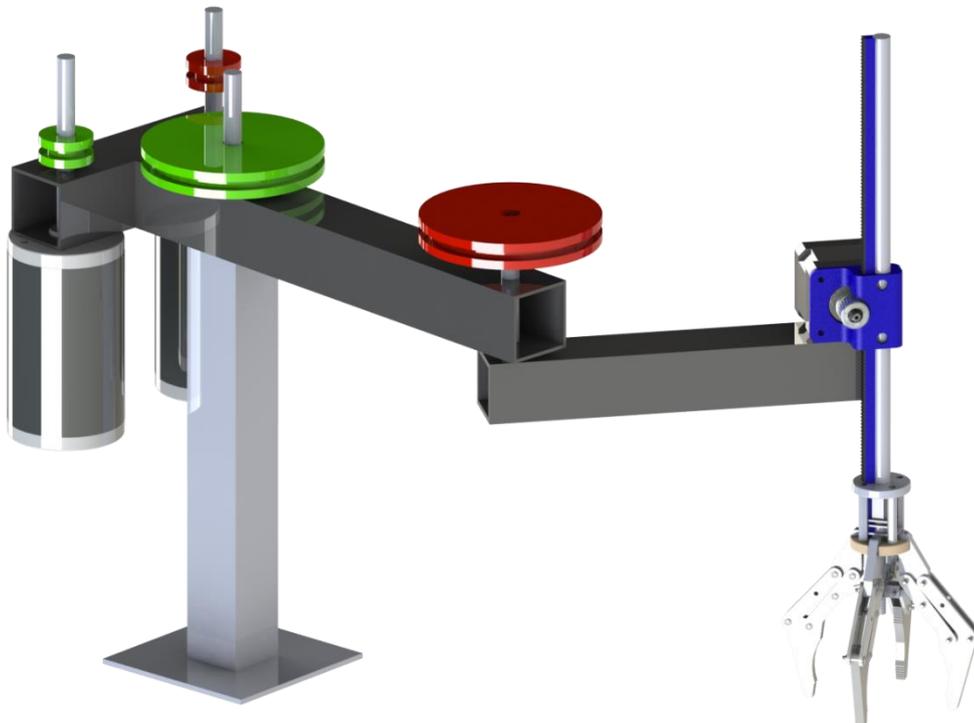


Figura 5.4 Esboço solução 2 (Elaborada pelo autor)

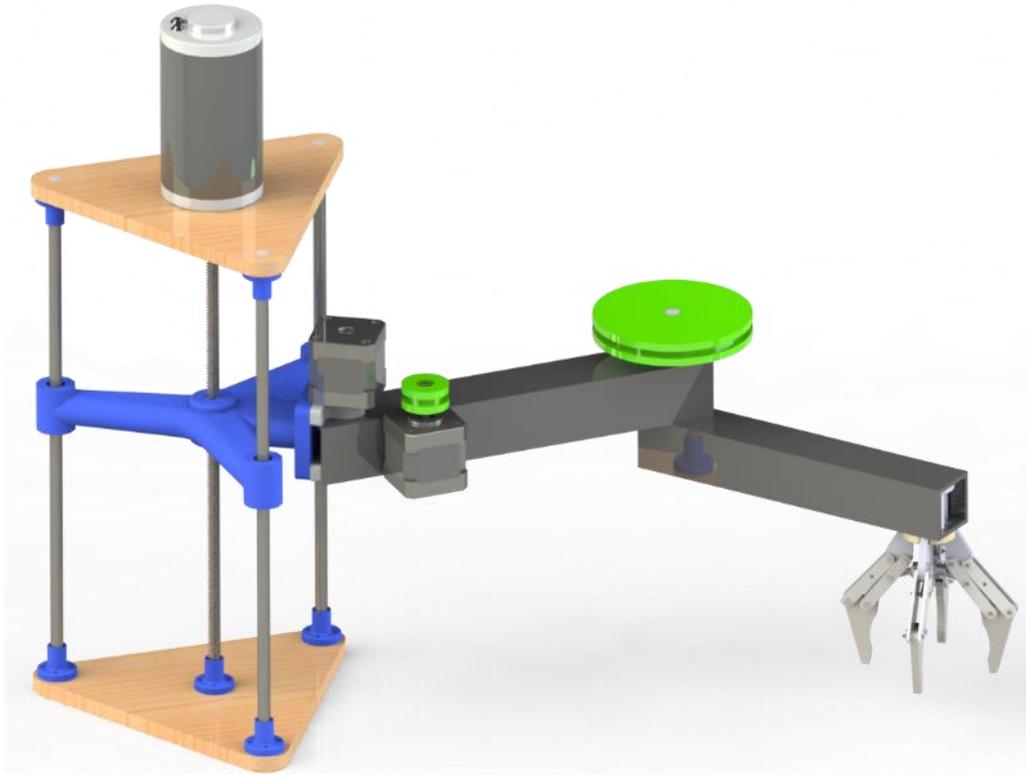


Figura 5.5 Esboço solução 3 (Elaborada pelo autor)

5.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE

A análise de viabilidade é uma das partes mais importantes do projeto conceitual sendo ela a responsável por analisar e comparar as soluções de forma a selecionar a que apresenta maior vantagem ao projeto. A análise desenvolvida a seguir teve como base o método presente em Madureira (2010), incluindo algumas alterações para melhor aplicação ao presente projeto. Sendo assim, ela foi dividida em três aspectos diferentes, sendo eles, uma análise da inércia do manipulador, visto sua influência na potência solicitada aos motores, e a precisão de posicionamento do manipulador, análise de viabilidade técnica para se verificar o atendimento da solução aos requisitos de projeto e a capacidade de fabricação do modelo, e por fim uma análise econômica das soluções de forma a estabelecer uma base comparativa de custo de implantação entre as soluções.

5.2.1 Análise de inércia do manipulador

Um dos fatores que mais influenciam no custo e no desempenho de um manipulador, é a inércia do mesmo, pois com maior inércia são requisitados atuadores mais robustos e caros, além de maior dificuldade no controle como pode-se ver nos resultados de Sahari (2011). Dessa forma foi construída a análise de inércia para cada uma das soluções, sendo uma análise de inércia realizada para as juntas rotacionais e uma análise de torque para acionamento das juntas prismáticas. Para a análise das inércias foi definido a geometria representativa mostrada na Figura (5.6), nela é apresentada a vista superior do

manipulador, onde foram indicados 6 pontos de concentração de massa. Para cada solução foram descritas as massas que estariam em cada ponto de concentração (Tabela 5.22) de forma que as inércias das juntas rotacionais pudessem ser calculadas pelas Eqs. (18) e (19). Para o cálculo das inércias foram assumidos valores de densidades para o alumínio, ferro fundido, e de pesos de atuadores comuns, as informações foram obtidas de catálogos de fabricantes como Gravia e SANYO DENKI, além de informações de sites de venda como o da empresa TDTEC, todas indicadas nas referências. É importante ressaltar que várias simplificações foram feitas de forma a facilitar a análise. Dessa forma, os resultados preliminares aqui apresentados são apenas para comparação entre as formas construtivas, tendo então a necessidade de uma análise mais detalhada para a definição da inércia do manipulador e posterior cálculo do torque de movimentação das juntas. Os valores de massa atribuídos aos componentes e aos parâmetros do manipulador estão apresentados na Tabela (5.23)

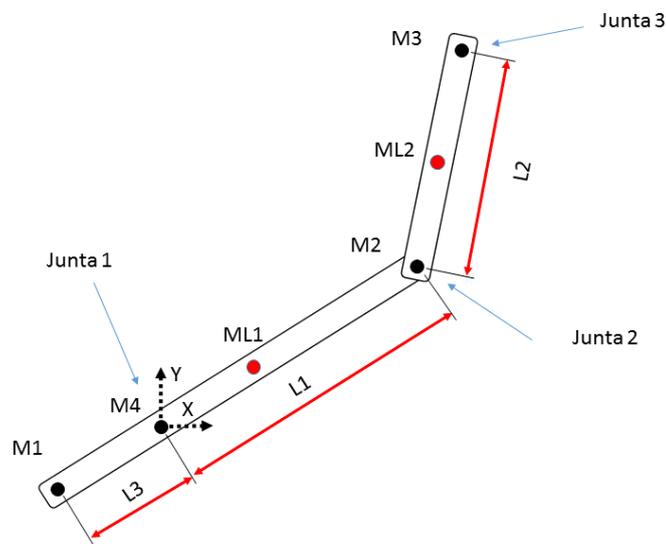


Figura 5.6 Disposição de massa adotada (Elaborada pelo autor)

Tabela 5.22 Elementos presentes nos concentradores de massa

Conjunto de massa	Solução 1	Solução 2	Solução 3
M1	Não há	Motor de maior torque e motor de menor torque	Não há
M2	Motor de menor torque	Não há	Não há
M3	Motor de menor torque	Carga de trabalho	Carga de trabalho
	Conjunto colar parafuso		
	Carga de trabalho		

Tabela 5.23 Parâmetros estimados para a análise de inércia

Parâmetros estimados	Símbolo	Grandeza
Peso do motor de maior potência (SM5601-8211)	-	0,6 kg
Peso motor Menor potência (SM5423-7211)	-	0,4 kg
Densidade linear do tubo (50x50X2mm)	-	1,040 g/mm
Peso conjunto fuso e colar	-	0,2 kg
Comprimento do segundo Link	L1	250 mm
Comprimento do segundo Link	L2	170 mm
Comprimento da extensão traseira	L3	100 mm
Diâmetro da engrenagem da cremalheira	d	8 mm
Avanço do parafuso de potência	l	8 mm
Coefficiente de atrito ferro fundido e latão	f	0,3
Ângulo de dente do perfil ACME	α	

Vale ressaltar que os elos foram selecionados com comprimentos diferentes para evitar choques com a base durante o acionamento.

Com base nos parâmetros estimados e disposição apresentada na Figura (5.6), foram elaboradas as equações para o cálculo das inércias nas juntas rotativas, a partir das equações básicas de momento de inércia relativo a um eixo (Eq. 16) e da teoria dos eixos paralelos (Eq. 17), ambas consultadas na referência Meriam (2009).

$$I = MR^2 \quad (16)$$

$$I_1 = I_0 + Mc^2 \quad (17)$$

$$I_2 = M_3L_2^2 + M_{l2} \frac{L_2^2}{4} \quad (18)$$

$$I_1 = I_2 + (M_3 + M_{l2})L_1^2 + M_2L_1^2 + M_1L_3^2 + M_{l1} \frac{L_1^2}{4} \quad (19)$$

Também foi realizada a análise de torque nas juntas prismáticas, para isso foi definido a massa que cada configuração deve elevar verticalmente (F) e com a Eq.(20), retirada da referência Budynas (2008), estimado o torque do parafuso de potência comercial consultado. Para o caso da solução 2 foi estimado o torque com a massa a ser levantada e o diâmetro de engrenagem assumido como 20 mm, conforme a Eq.(21).

$$T = Fd \left(\frac{l + \pi fd \sec(\alpha)}{\pi d - fl \sec(\alpha)} \right) \quad (20)$$

$$T = F \cdot d/2 \quad (21)$$

Com a realização da análise descrita foram obtidos os valores de inércia e torque presentes na Tabela (5.24), usando a aceleração de 50mm/s².

Tabela 5.24 Resultados comparativos de inércias e torques

	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Primeira junta (kg · m ²)	0.026	0.021	0.012
Segunda Junta (kg · m ²)	0.108	0.081	0.046
Torque em Z (kgf · cm)	2.96	3.38	5.19

5.2.2 Viabilidade de Técnica

Para analisar a viabilidade técnica de execução das soluções foram levantados os pontos mais críticos para a construção, apontando as principais dificuldades de cada solução.

Solução 1 (Figura 5.3): Um dos pontos críticos da configuração desta solução é o posicionamento dos motores nas juntas que além de aumentar sua inércia devido ao posicionamento gera maiores esforços na estrutura uma vez que o peso dos atuadores é grande quando comparado ao demais componentes. Uma forma de aumentar a rigidez do braço é o uso de juntas fabricadas em alumínio que tem boa relação entre peso e rigidez. Outro ponto a ser analisado é que, em caso de necessidade de redução junto ao motor para aumento do torque de saída, as opções disponíveis para a redução nas juntas seriam redutores de engrenagens devido a sua estrutura mais compacta, mas dessa forma seriam de difícil fabricação se não adquiridos juntamente com o motor, e de qualquer forma, adicionariam ainda mais inércia de movimentação. Foi montada assim, uma comparação entre vantagens e desvantagens pertinentes a solução 1 (Tabela 5.25).

Tabela 5.25 Análise de benefícios da solução 1

SOLUÇÃO 1	
Vantagens	Desvantagens
Rigidez na transmissão	Maior inércia rotacional para controle
Construção mais compacta	Necessidade de estrutura mais rígida
Menor torque para junta prismática	Vibração pela movimentação na ponta
Estrutura mais comum a robôs industriais	Redutor mais compacto se necessário
	Maior gerenciamento de cabos e conexões
	Maior momento de flexão nos eixos

Solução 2 (Figura 5.4): Na solução dois, é possível ver uma manobra para reduzir a deflexão do braço, que consiste em deslocar os motores das juntas para contrabalancear a estrutura em relação ao eixo de rotação da base. Um dos pontos a ser observado quanto a garantia do bom funcionamento da solução é a qualidade do engaste do primeiro eixo junto a base de sustentação visto que esse se apresenta em balanço. O posicionamento dos motores possibilita o tensionamento das correias de transmissão e simplificam a montagem e manutenção. O uso da cremalheira como mecanismo de movimentação vertical gera um erro de histerese devido a folga inerente do mecanismo, essa folga não é um fator crítico para a elevação da carga devido a ação da gravidade, porém em ações de encaixe está pode gerar imprecisão no posicionamento e reduzir a rigidez do eixo Z. O uso de perfis retangulares de alumínio simplifica a fabricação dos links e da base de sustentação, além disso, o deslocamento dos motores reduz a rigidez exigida da junta (em comparação com a solução 1), possibilitando assim o uso materiais com menor rigidez para a fabricação das juntas, sendo uma das formas de fabricação o uso da manufatura aditiva (impressão 3D) o que simplifica o acesso ao maquinário para fabricação. O uso de transmissão por correia também adiciona uma característica de complacência ao plano horizontal. A análise de vantagens e desvantagens pertinente a solução 2 está na Tabela (5.26)

Tabela 5.26 Análise de benefícios da solução 2

SOLUÇÃO 2	
Vantagens	Desvantagens
Maior distribuição da carga na estrutura	Eixo principal em balanço
Maior ângulo de movimentação das juntas	Flexibilidade devido a transmissão
Redução da inércia de movimentação	Folga devido a cremalheira
Praticidade de tensionamento das correias	Vibração devido ao movimento na ponta
Movimentação mais rápida na direção Z	Maior torque no eixo Z devido cremalheira (em relação a primeira solução)
	Movimento menos rígido no Z (em relação a primeira solução)

Solução 3 (Figura 5.5): A terceira solução usa de movimentação prismática na base do manipulador, sendo assim a solução que menos exige torque dos motores para as juntas rotativas, e que solicita menor rigidez da estrutura, possibilitando o uso de polímeros na maior parte do manipulador e simplificando a sua fabricação. A composição do eixo vertical pelo alinhamento das guias lineares gera maior precisão na movimentação prismática. A solução, porém, reduz a possibilidade do manipulador de realizar operações em um espaço de trabalho com obstáculos, visto que o eixo vertical movimenta o braço como um todo. A análise de vantagens e desvantagens pertinente a solução 3 está na Tabela (5.27)

Tabela 5.27 Análise de benefícios da solução 3

SOLUÇÃO 3	
Vantagens	Desvantagens
Menor inércia rotacional	Redução do ângulo de trabalho
Boa complacência no plano XY	Menor velocidade no eixo Z
Centro de massa próximo a base	Flexibilidade devido a transmissão
Auto travamento no eixo Z	Maior carga de movimentação no eixo Z
Maior velocidade no plano XY	Maior número de componentes que podem adicionar folga no eixo Z
Base prática para transporte	Maior dificuldade de montagem
Desvio de objetos superiores	Maior número de componentes para adicionar folgas e imprecisões

Após a descrição da dificuldade de implantação de cada uma das soluções foi então realizada análise de viabilidade (Tabela 5.28), verificando o atendimento aos principais requisitos de projeto levantados pela matriz de QFD, e o atendimento as funções principais do manipulador.

Tabela 5.28 Análise de atendimento aos requisitos

PARÂMETRO	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3
Distribuição do peso	Não atende	Atende	Atende
Fácil manutenção	Parcialmente	Atende	Atende
Baixa flexão	Parcialmente	Atende	Atende
Complacência XY	Parcialmente	Atende	Atende
Rigidez Z	Atende	Parcialmente	Atende
Baixa inércia	Não atende	Parcialmente	Atende
Fabricação simples	Não atende	Atende	Atende
Montagem simples	Parcialmente	Atende	Não atende
Folga reduzida	Atende	Atende	Parcialmente
Boa aparência	Parcialmente	Parcialmente	Atende
Desvio de obstáculos	Atende	Atende	Parcialmente
Velocidade no eixo Z	Parcialmente	Atende	Parcialmente

5.2.3 Viabilidade Econômica

Para a análise de viabilidade econômica foram listados os principais componentes necessários a cada um dos modelos de solução, e posteriormente levantado os valores de compra de cada componente nas

plataformas virtuais de lojas como (TDTEC, Gravia e Brasília metais). Com a estimativa da quantidade de componentes e seus custos marginais.

Dessa forma chegamos à conclusão que, do ponto de vista econômico, a solução que se destaca é a **solução 2**, em segundo lugar a solução 3 com uma diferença de custo de **11%** em relação a solução 2 e pôr fim a solução 1 com uma diferença de **30%** em relação a solução 3. É importante ressaltar que essa análise é apenas uma estimativa preliminar para a avaliação das soluções, não representando um orçamento final de projeto, visto que podem alterar os valores ante a variação comercial quanto o custo de transporte dos materiais que não foi analisado nessa estimativa.

Dessa forma, priorizando o custo, a facilidade de montagem e fabricação, a velocidade de operação e buscando atender aos requisitos principais a **solução 2** é a escolha para o projeto.

6 PROJETO PRELIMINAR

Este capítulo tem como objetivo a definição da montagem do manipulador de forma a se ter um desenho base para a realização do cálculo dos esforços mecânicos bem como a análise de possíveis modos de falha do manipulador, ao final se obtendo a geometria completa do manipular final

6.1 MODELAGEM

Tendo em vista os principais requisitos extraídos da análise de QFD e os possíveis meios de fabricação para a solução selecionada, foi desenvolvido o modelo virtual do manipulador sendo ele aprimorado até que se obteve um modelo final que facilitasse a fabricação e reduzisse os erros da montagem. No desenho do manipulador foram levados em conta os principais causadores de folga e imprecisões observados no trabalho de Mello OPM (2016), sendo os mais evidentes listados abaixo.

- Uso de dobras de chapa de alumínio para a construção das juntas gerou a maior parte dos erros de paralelismo entre os eixos do manipulador.
- Uso de buchas de Nylon para o engaste dos eixos nos elos que acabaram gerando folgas de montagem durante a operação do manipulador.

Tendo em vista esses problemas na construção anterior, e problemas de controle como os relatados por (Sahari, 2011), que ocorreram devido a grande inércia do manipulador o que dificultava a desaceleração do movimento. Além disso a criação do modelo buscou atender aos requisitos levantados na análise de QFD como mais relevantes, como a rigidez da estrutura, fácil fabricação e montagem, baixo custo e boa durabilidade. Para isso se deu preferência a construção com maior quantidade de componentes comerciais e peças de fácil fabricação. O resultado da concepção do manipulador é mostrado nas Figura (6.1) a (6.3) e será melhor detalhado a seguir.



Figura 6.1 Solução final para manipulador (Elaborada pelo autor)

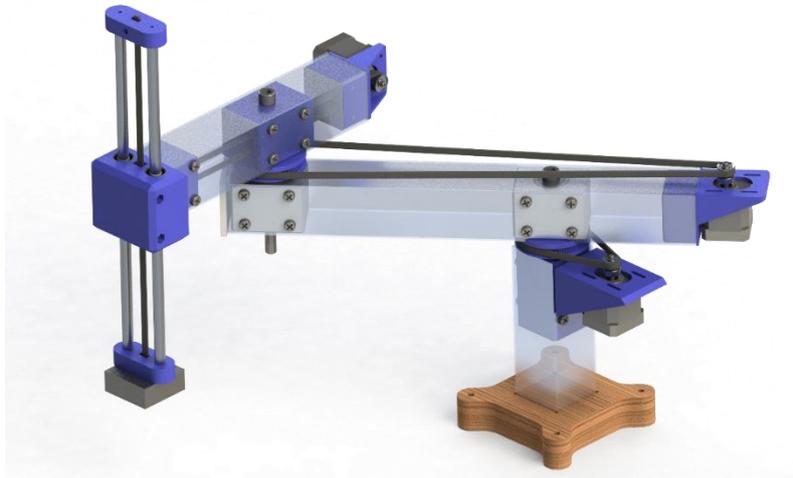


Figura 6.2 Visualização da estrutura interna das juntas (Elaborada pelo autor)

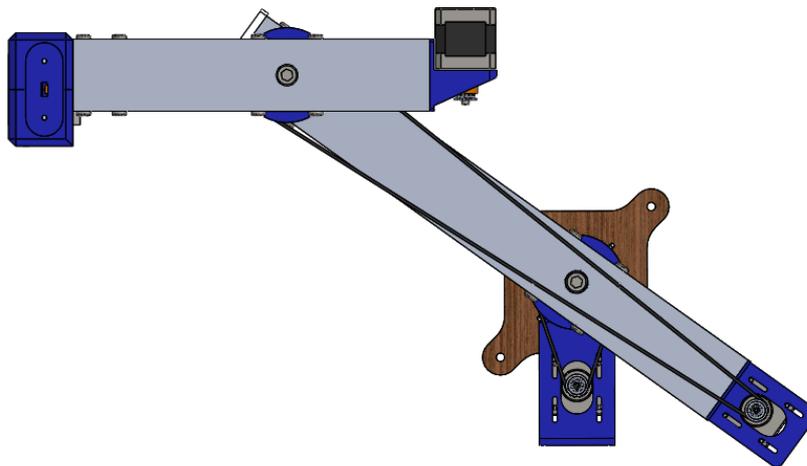


Figura 6.3 Vista superior da solução (Elaborada pelo autor)

6.1.1 Modelo de construção das juntas

Um dos principais problemas observados na construção de manipuladores didáticos não comerciais é a folga existente nas juntas dos elos, gerando problemas de paralelismo entre os eixos e grandes problemas de precisão. Um dos elementos que podem afetar de forma primordial essa precisão é o engaste do primeiro elo do manipulador no ambiente de trabalho, uma vez que uma pequena inclinação do mesmo pode gerar erros apreciáveis no fim da cadeia cinemática, como é o caso do manipulador desenvolvido por Mello OPM (2016), que embora conte com um engaste rígido na base de trabalho, apresenta problemas de perpendicularidade na base de referência, problema esse devido ao uso da seção de corte do perfil como referência para a fixação da base, dessa forma a precisão do corte influencia muito a qualidade do engaste. Visto isso, optou-se pelo uso da lateral do perfil como referência já que sua superfície é fabricada com excelente tolerância no alinhamento e esquadro entre suas faces do perfil além de possibilitar uma maior área de contato para o engaste do elo na base. Para a realização desse engaste foi usada uma placa de MDF cortada em uma fresadora CNC para garantir o esquadro da superfície que entraria em contato com o perfil. Após a fabricação das peças, estas são unidas sob

interferência com o auxílio de uma prensa. Uma vista de corte do engaste é apresentada na Figura (6.4) e sua montagem na figura (VISTA explodida).

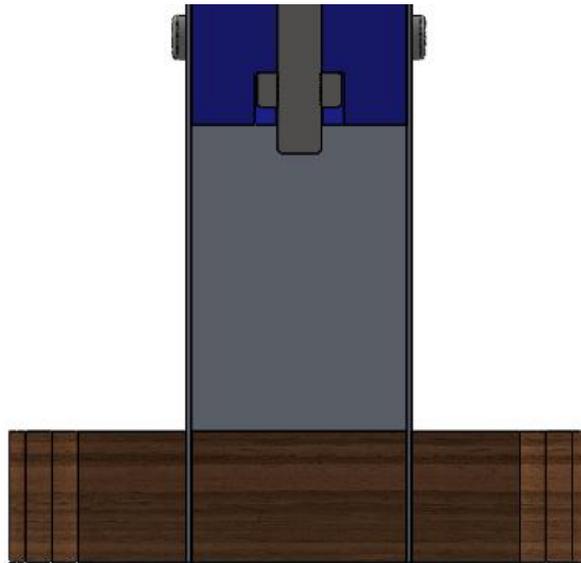


Figura 6.4 Vista de corte do engaste da base (Elaborada pelo autor)

De forma muito similar, a conexão entre os elos moveis gera folga na estrutura e propaga erros para o posicionamento. No modelo anterior (Mello OPM, 2016) a conexão entre os elos moveis é realizada com buchas que de Nylon que são parafusadas nos elos e encaixadas diretamente nos eixos ou em rolamentos de acordo com o tipo de união. Como pode-se ver na Figura (3.5), esse tipo de união possui folgas advindas tanto dos parafusos que unem elos e buchas com uma pequena superfície de contato, quanto do encaixe entre buchas e eixos. Para a minimização dessas folgas, foi definido um sistema de montagem das juntas onde a conexão entre eixos e elos é feita por blocos que usam de uma maior área de contato com as paredes do elo para uma montagem mais rígida e livre de folgas. Esses blocos de material têm como objetivo secundário propiciar preenchimento interno ao tubo para que a junta seja prensada pelo eixo central, de forma que a ligação permaneça rígida e com folgas minimizadas. Como pode-se ver na Figura (6.5) o eixo central permanece fixo ao bloco interno do primeiro elo (bloco em azul) e permite a movimentação do segundo elo pelo uso dos rolamentos radiais unidos ao bloco interno do segundo elo (bloco em branco). Devido ao uso do eixo central para a compressão da montagem foi selecionado um rolamento axial para intermediar o contato entre as superfícies com movimento relativo. Os blocos internos aos elos são fixados a estes por meio de parafusos rosca soberba apenas para impedir que os blocos deslizem internamente nos elos e alterem a distância entre os eixos, pois a perpendicularidade entre eixos e tubos que formam a montagem se dá pelo contato da superfície dos blocos com os elos e eixos. O mesmo sistema de montagem foi adotado para a segunda junta que une o segundo e terceiro elo, como pode-se ver na Figura (6.6).

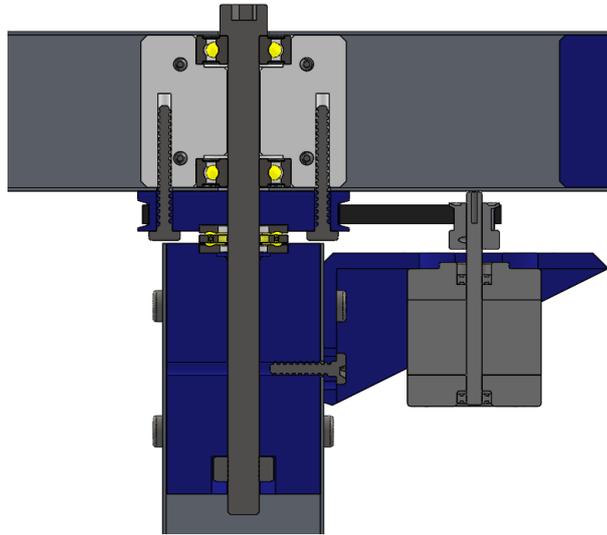


Figura 6.5 Montagem interna da primeira junta

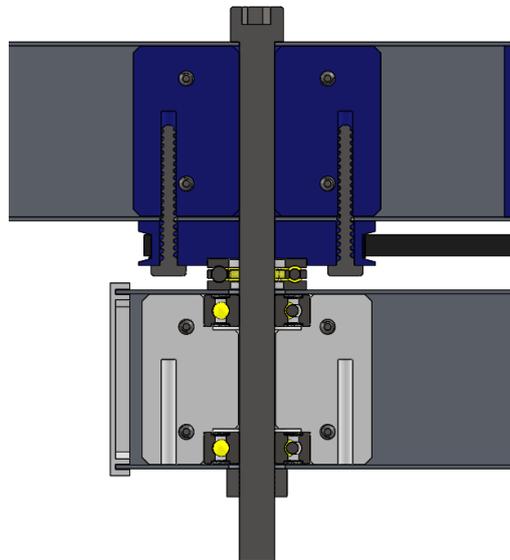


Figura 6.6 Montagem interna da segunda junta

6.1.2 Mecanismo de movimentação linear

Para a movimentação prismática da extremidade do manipulador foi selecionado conjunto pinhão cremalheira ao fim do projeto conceitual. Porém devido as folgas entre o pinhão e a cremalheira, que são advindas tanto do processo de fabricação como do desgaste do contato das peças, e ao aumento da inércia do manipulador com esse sistema montado na extremidade do braço, foram buscadas alternativas para a substituição do mecanismo. Uma solução encontrada que possibilitou o deslocamento do motor de acionamento para uma posição mais favorável e uma movimentação suave foi o uso da boa tolerância existente entre polias e correias dentadas para o acionamento da junta. Assim a solução adotada foi o uso de uma correia interrompida, fixada aos limites da junta prismática, que transmite a movimentação circular do motor (posicionado na parte traseira do elo) para o deslizamento das guias lineares na junta

prismática, como pode-se observar na Figura (6.7), onde notasse o uso de rolamentos flangeados para o desvio de direção da correia.

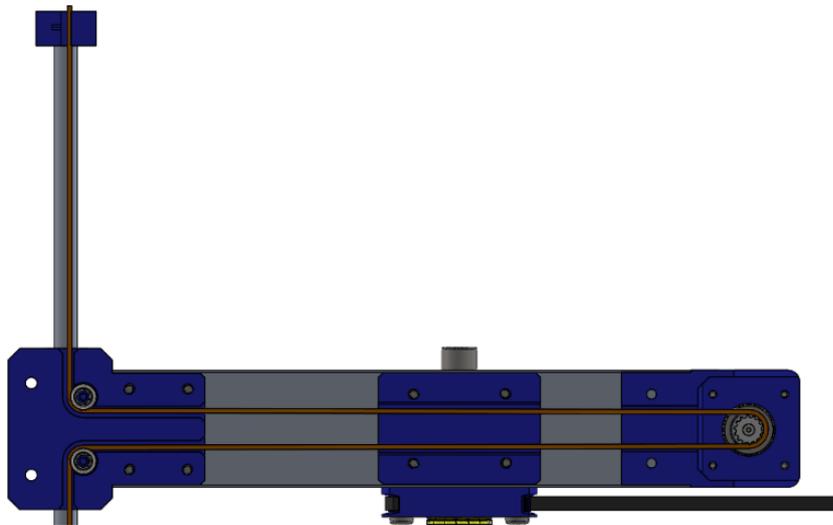


Figura 6.7 Mecanismo de movimento linear

Uma observação interessante em relação ao percurso da correia é que ele teve de ser deslocado em relação ao centro do perfil de forma que o eixo que mantém a junta unida não entrasse em contato com a correia. Pode-se ver esse deslocamento na vista de corte presente na Figura (6.8).

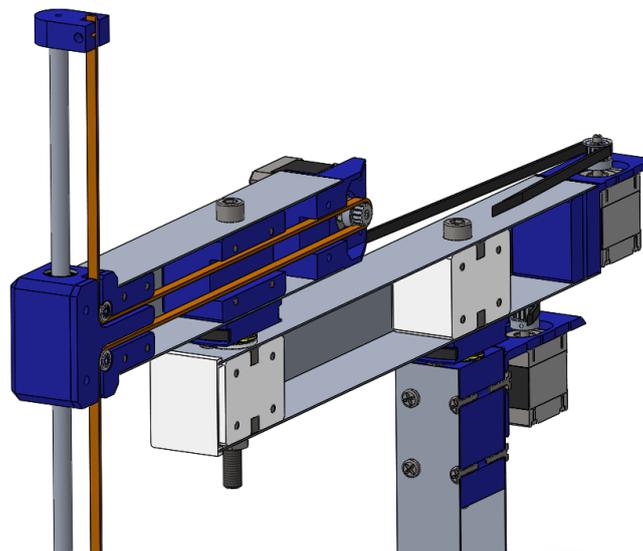


Figura 6.8 Vista isométrica em corte

Com base nas decisões anteriormente citadas e em outras decisões de projeto que visaram facilitar a fabricação e montagem foi finalizado o conceito do manipulador e iniciado os cálculos estruturais para definição de materiais, formas e dimensões dos componentes. As vistas explodidas das montagens dos elos são apresentadas nas Figura (6.9) a (6.11).

6.2 ANÁLISE DINÂMICA

Como relatado na anteriormente a realização da análise dinâmica permite que se obtenha os torques necessários em cada junta para a movimentação do manipulador em determinadas velocidades e acelerações. Sendo ela responsável pela seleção otimizada dos atuadores necessários para cada uma das juntas. No presente projeto se optou por usar a abordagem de energias para a obtenção do modelo dinâmico do manipulador, para isso, foram assumidas as seguintes hipóteses e aproximações.

- Centro de massa de cada elo alinhado com seu comprimento;
- Energia potencial nula para o movimento planar do SCARA;
- Atrito nulo nas juntas de rotação, sendo compensado no fator de segurança;

Considerando as aproximações citadas foi montado a representação e identificação de variáveis como se mostra na Figura (6.12). Com base na representação montada e nas Eq. (12) e (13) foi desenvolvido o presente raciocínio.

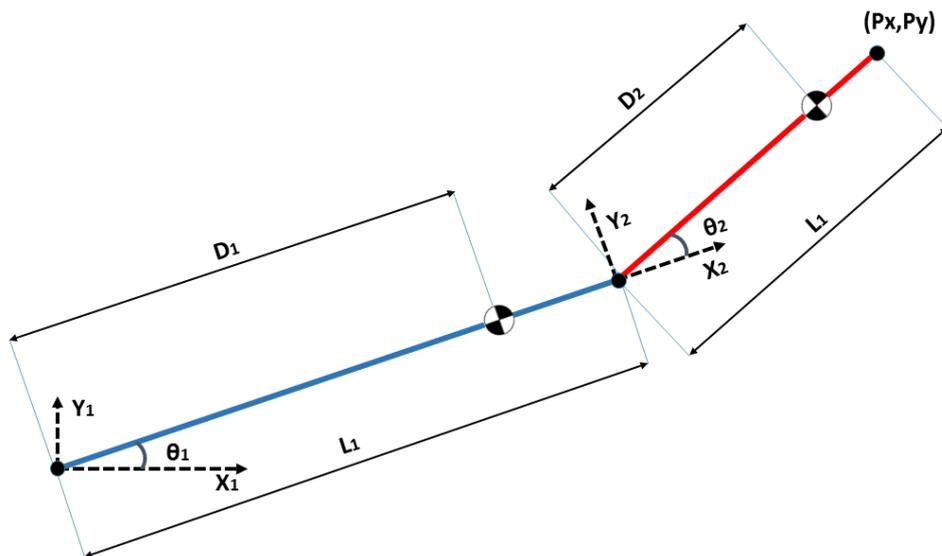


Figura 6.12 Diagrama esquemático SCARA

Pela Eq. (12)

$$L = E_c - E_p$$

O que com a ausência da componente de energia potencial E_p resumimos para;

$$L = E_c = \frac{1}{2} m_i v^2 + \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}^2 \quad (22)$$

Que resolvemos para o primeiro elo de massa m_1 e momento de inércia no centro de massa I_1 como;

$$E_{c1} = \frac{1}{2}m_1(CM_1L_1\dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2}I_i\dot{\theta}^2 \quad (23)$$

Onde o termo CM_1 representa a razão entre a distância do centro de massa ao eixo de rotação da junta e o comprimento do elo. Assim $CM_1=1$ indica centro de massa na extremidade do elo e $CM_1=0$ indica centro de massa coincidente com o de rotação. Para a energia cinética do segundo elo temos a seguinte dedução;

Pode-se verificar que a posição do centro de massa do segundo elo é dada por:

$$X_{cm2} = L_1C\theta_1 + CM_2L_2C\theta_{12} \quad (24)$$

$$Y_{cm2} = L_1S\theta_1 + CM_2L_2S\theta_{12} \quad (25)$$

Onde,

$$\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2 \quad (26)$$

$$C\theta_1 = \cos(\theta_1) \quad (27)$$

$$S\theta_1 = \sin(\theta_1) \quad (28)$$

Derivando as equações temos as velocidades para o centro de massa;

$$\dot{X}_{cm2} = -L_1S\theta_1\dot{\theta}_1 - CM_2L_2S\theta_{12}\dot{\theta}_{12} \quad (29)$$

$$\dot{Y}_{cm2} = L_1C\theta_1\dot{\theta}_1 + CM_2L_2C\theta_{12}\dot{\theta}_{12} \quad (30)$$

Pode-se encontrar assim a resultante de velocidade como;

$$V_{cm2}^2 = \dot{X}_{cm2}^2 + \dot{Y}_{cm2}^2 \quad (31)$$

Que após a aplicação das multiplicações e algumas simplificações encontramos;

$$V_{cm2}^2 = L_1^2\dot{\theta}_1^2 + CM_2^2L_2^2\dot{\theta}_{12}^2 + 2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12}C\theta_2 \quad (32)$$

Assim temos que;

$$E_{c2} = \frac{1}{2}m_2 (L_1^2\dot{\theta}_1^2 + CM_2^2L_2^2\dot{\theta}_{12}^2 + 2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12}C\theta_2) + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_{12}^2 \quad (33)$$

Para a primeira junta o Laplaciano fica da seguinte forma;

$$L = E_{c1} + E_{c2} = \frac{1}{2}m_1(CM_1L_1\dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2(L_1^2\dot{\theta}_1^2 + CM_2^2L_2^2\dot{\theta}_{12}^2 + 2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12}C\theta_2) + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_{12}^2 \quad (34)$$

De onde pode-se obter os elementos para aplicação na Eq.(13) como;

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = m_1CM_1^2L_1^2\dot{\theta}_1 + I_1\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2}m_2[2L_1^2\dot{\theta}_1 + 2CM_2^2L_2^2\dot{\theta}_{12} + 2L_1L_2CM_2C\theta_2(\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12})] + I_2\dot{\theta}_{12} \quad (36)$$

Derivando esta última equação em relação ao tempo temos;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) = m_1CM_1^2L_1^2\ddot{\theta}_1 + I_1\ddot{\theta}_1 + \frac{1}{2}m_2\{2L_1^2\ddot{\theta}_1 + 2CM_2^2L_2^2\ddot{\theta}_{12} + 2L_1L_2CM_2 \cdot [-S\theta_2 \cdot \dot{\theta}_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{12}) + C\theta_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{12})]\} + I_2\ddot{\theta}_{12} \quad (37)$$

Assim substituindo as Eqs. (35) e (62) em Eq.(13) temos o seguinte resultado para o torque na primeira junta;

$$\tau_1 = m_1CM_1^2L_1^2\ddot{\theta}_1 + I_1\ddot{\theta}_1 + \frac{1}{2}m_2\{2L_1^2\ddot{\theta}_1 + 2CM_2^2L_2^2\ddot{\theta}_{12} + 2L_1L_2CM_2 \cdot [-S\theta_2 \cdot \dot{\theta}_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{12}) + C\theta_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{12})]\} + I_2\ddot{\theta}_{12} \quad (38)$$

De forma similar temos para a segunda junta;

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \frac{1}{2}m_2[-2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12}S\theta_2] \quad (39)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \frac{1}{2}m_2[2CM_2^2L_2^2\dot{\theta}_{12} + 2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1C\theta_2] + I_2\dot{\theta}_{12} \quad (40)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right) = \frac{1}{2}m_2[2CM_2^2L_2^2\ddot{\theta}_{12} + 2L_1CM_2L_2(C\theta_2\ddot{\theta}_1 - S\theta_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)] + I_2\ddot{\theta}_{12} \quad (41)$$

Substituindo as Eqs. (39) e (62) em Eq.(13) temos o seguinte resultado para o torque da segunda junta;

$$\tau_2 = \frac{1}{2}m_2[2CM_2^2L_2^2\ddot{\theta}_{12} + 2L_1CM_2L_2(C\theta_2\ddot{\theta}_1 - S\theta_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)] + I_2\ddot{\theta}_{12} + m_2L_1CM_2L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_{12}S\theta_2 \quad (42)$$

6.2.1 Validação dos resultados

De posse dos resultados apresentados, foi montada uma rotina para o cálculo dos torques, que seriam alimentados com as informações consultadas na modelagem do manipulador. Informações como massa,

posição do centro de massa e momentos de inércia para a rotação de cada um dos elos foram obtidas com a atribuição das características de material para cada um dos componentes na modelagem feita no Solidworks. As massas específicas usadas na modelagem podem ser consultadas na Tabela (6.1).

Tabela 6.1 Propriedades de massa atribuídas

Material	Massa específica (kg/m ³)
Polímero ABS	1020
Alumínio	2700
Aço SAE 1045	7850
Motor de passo NEMA 17	Massa de 320g

Com as equações e dados inseridos na rotina foram definidas as velocidades e acelerações angulares desejadas para cada uma das juntas, a escolha desses parâmetros foi feita de forma a mediar a necessidade e segurança durante a operação do manipulador, para isso levou-se em conta também os valores atribuídos aos manipuladores apresentados no Capítulo 0. As acelerações e velocidades adotadas para o manipulador são apresentadas na Tabela (6.2).

Tabela 6.2 Velocidades e acelerações atribuídas

Grandezas (valores máximos)	Valores adotados
Velocidade do manipulador acionado pela primeira junta (V_1)	400 mm/s
Velocidade angular ($\dot{\theta}_1$)	1 rad/s
Aceleração angular ($\ddot{\theta}_1$)	2 rad/s ²
Velocidade do manipulador acionado pela segunda junta (V_2)	300 mm/s
Velocidade angular ($\dot{\theta}_2$)	2 rad/s
Aceleração angular ($\ddot{\theta}_2$)	4 rad/s ²
Velocidade Junta prismática (V_3)	100mm/s
Aceleração junta prismática (a)	100mm/ s ²

Antes de iniciar as iterações para encontrar os torques das juntas foi realizada uma comparação com o modelo desenvolvido por Sahari (2011) onde Sahari realizou uma análise dinâmica para um manipulador SCARA (Fig. 6.13) porém, usando as simplificações de massa homogeneamente distribuída ao longo dos elos e ausência de atrito. Dessa forma Sahari (2011) obteve os resultados apresentados nas Eqs. (43) e (44). Assim, foram realizadas as simplificações necessárias no modelo aqui desenvolvido (considerando os centros de massa na metade dos elos) para a comparação entre modelos, onde se obteve completa convergência dos resultados.

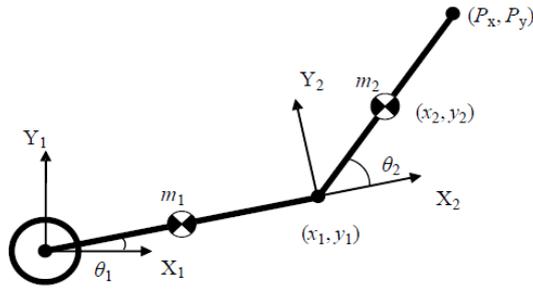


Figura 6.13 Modelo de referência

$$\tau_1 = \left[\left(\frac{1}{3} m_1 m_2 \right) L_1^2 + \frac{1}{3} m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 C \theta_2 \right] \ddot{\theta}_1 + m_2 \left(\frac{1}{3} L_2^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 C \theta_2 \right) \ddot{\theta}_2 - m_2 L_1 L_2 S \theta_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) - \frac{1}{2} m_2 L_1 L_2 S \theta_2 (\dot{\theta}_2^2) \quad (43)$$

$$\tau_2 = \left(\frac{1}{3} m_2 L_2^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1 L_2 C \theta_2 \right) \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} m_2 L_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_2 L_1 L_2 S \theta_2 (\dot{\theta}_1^2) \quad (44)$$

6.2.2 Resultados de torque para as juntas

Para a determinação do torque para o motor de acionamento da junta prismática foi realizada uma análise simplificada dos esforços com uma estimativa do atrito relacionado ao movimento. Como a movimentação se dá pela mesma relação que um sistema pinhão cremalheira onde a velocidade tangencial do pinhão (neste caso, a polia) é igual a velocidade linear da cremalheira (no caso, a correia). Se considerou o levantamento de uma carga de 0,5kg (m_z), sendo a carga útil de trabalho de 0,4kg e 0,1kg para o movimento do mecanismo da junta prismática. Além disso, se considerou uma componente de atrito devido ao tensionamento e ao desvio da correia nos rolamentos flangeados, atrito esse, que não supera 20% da carga do sistema. A Figura (6.14) mostra o diagrama usado na análise, dando como resultado a Eq.(62), onde a representa a aceleração desejada e g a gravidade local .

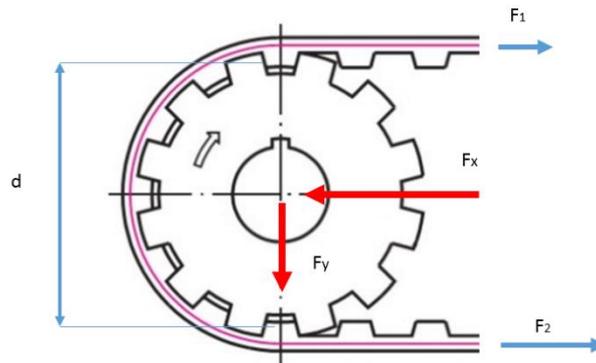


Figura 6.14 Diagrama de forças eixo Z

$$\tau_z = (F_2 - F_1) \frac{D}{2} = m_z (a + g) \frac{D}{2} \quad (45)$$

Com a aplicação da componente de atrito estimada e do fator de segurança de 1,5 temos a Eq.(46)(62).

$$\tau_z = 1,5 \cdot 1,2 \cdot m_z(a + g) \frac{D}{2} \quad (46)$$

Com a análise dinâmica foram feitas iterações entre os cálculos de forma a conciliar os resultados de torque com o projeto dos eixos, elos, juntas e com a seleção dos motores e demais componentes. Ao fim das iterações entre os cálculos se obtiveram os resultados apresentados na Tabela (6.3).

Tabela 6.3 Resultados da análise dinâmica

τ_1	τ_2	τ_z
1,17Nm	0,44Nm	0,046Nm

Onde os torques da Tabela (6.3) representam os torques necessários nas juntas, ou seja, já na saída da redução.

6.3 ANÁLISE DE RIGIDEZ DOS ELOS

Uma vez definido o uso de tubos de alumínio para a fabricação dos elos do manipulador surge a necessidade de dimensioná-lo garantindo que seu peso e rigidez sejam otimizados, pois afetaram tanto a inércia de rotação do manipulador quanto a sua precisão no posicionamento. Se optou por usar um tubo com maior seção transversal para que se possa acomodar internamente os rolamentos e aumentar a área de contato entre os tubos e blocos que formam as juntas. Partindo inicialmente da seção transversal usada no trabalho de Mello OPM (2016), que é de 50x50mm de seção externa e 2mm de espessura, foi realizada primeiramente a análise de deflexão dos tubos com base na teoria de deflexão de vigas, presente na referência Budynas (2008). Sabendo que os três elos que compõem a estrutura podem ter seus carregamentos aproximados como vigas engastadas sob a aplicação de momentos ou forças pontuais. Assim, foi analisado o carregamento e desenhados os diagramas de corpo livre e de esforços internos para cada um dos elos.

Inicialmente foi obtido o diagrama de corpo livre para cada um dos elos com o auxílio da plataforma Viga Online, como mostram as Figuras (6.15) a (6.17), onde os esforços em verde e azul representam a resultante do peso do manipulador aplicado ao centro de massa do elo.

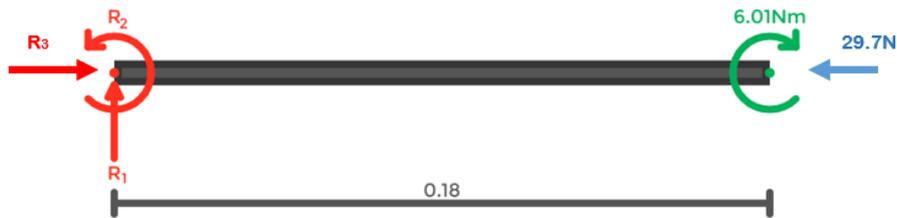


Figura 6.15 DCL Primeiro elo

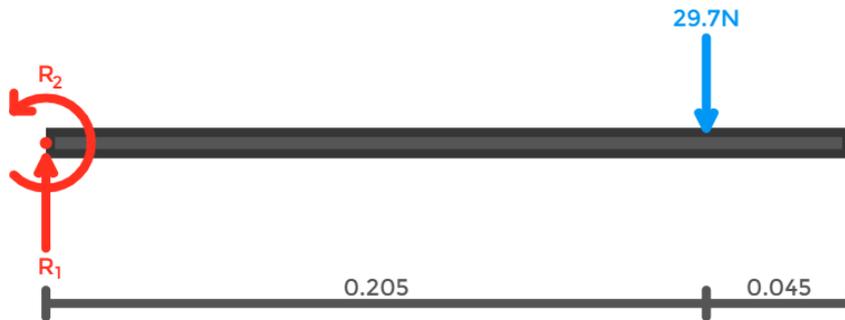


Figura 6.16 DCL segundo elo

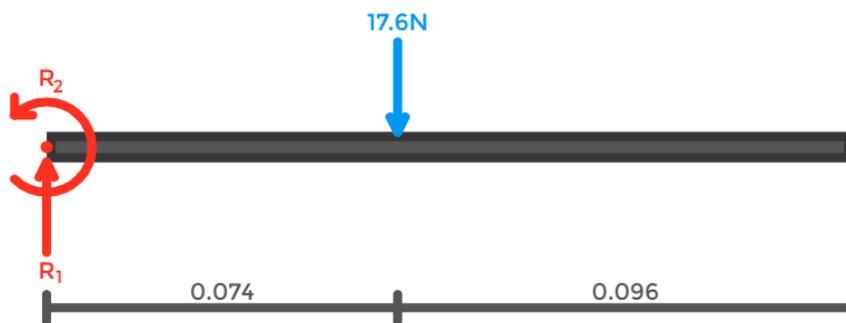


Figura 6.17 DCL terceiro elo

Com diagramas de corpo livre foram aplicadas as equações de equilíbrio de forças e momentos para se obter as reações nos apoios, as reações encontradas são apresentadas na Tabela (6.4).

Tabela 6.4 Reações nos elos

Reações	Primeiro Elo	Segundo elo	Terceiro Elo
R1	0	29,7N	17,6N
R2	6,01Nm	6,09Nm	1,30Nm
R3	29,7N	0	0

Uma vez se obtendo o valor das reações se pode realizar um corte no comprimento do elo para se obter os esforços internos por meio da condição de equilíbrio de forças e momentos. Dessa forma se obteve as equações para o momento fletor em cada um dos elos. Visto que o esforço cortante é desprezível em relação ao momento fletor, se optou por descartar sua influência para cálculo das tensões

críticas, analisando apenas a reação normal do primeiro elo e o momento fletor em cada um dos elos. As Figura (6.18) a Figura (6.20) mostram os diagramas de momento fletor em cada um dos elos, e as Eqs.(47) a (49) são relativas a cada um dos diagramas.

- Primeiro elo;

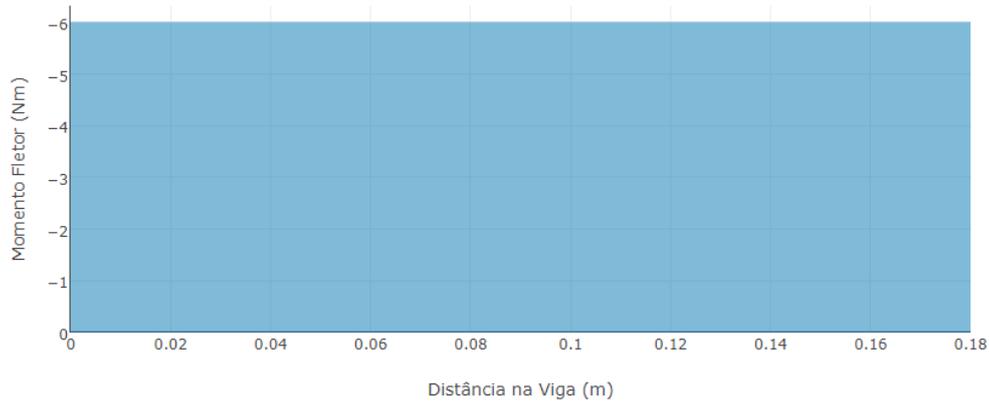


Figura 6.18 Momento fletor no primeiro elo

$$M_{f1} = -R_2 = -6.01Nm \quad \text{para } x \in [0; 0,18] \quad (47)$$

- Segundo Elo

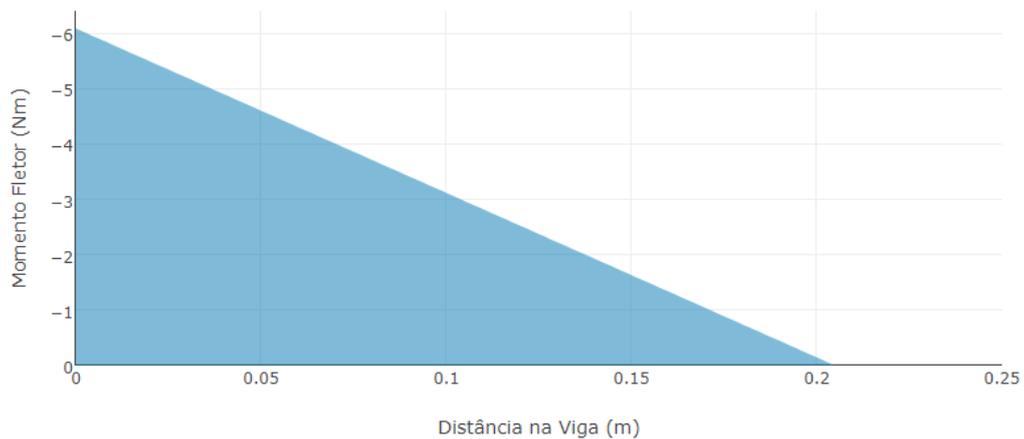


Figura 6.19 Momento fletor no segundo elo

$$M_{f2} = R_1 \cdot x - R_2 = 29,7 \cdot x - 6.09 \quad \text{para } x \in [0; 0,205]$$

$$M_{f2} = 0 \quad \text{para } x \in [0,205; 0,250] \quad (48)$$

- Terceiro Elo

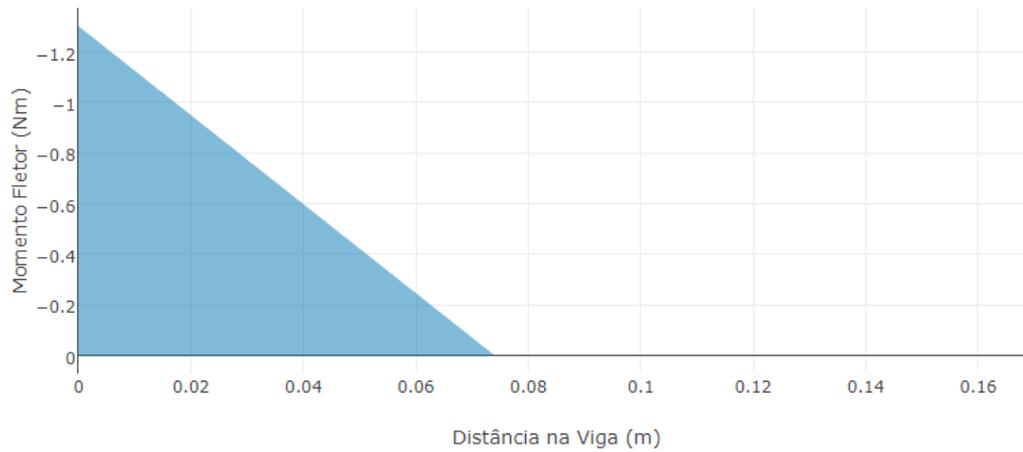


Figura 6.20 Momento fletor no terceiro elo

$$\begin{aligned} M_{f3} &= R_1 \cdot x - R_2 = 17,6 \cdot x - 1,3 \quad \text{para } x \in [0; 0,074] \\ M_{f3} &= 0 \quad \text{para } x \in [0,074; 0,170] \end{aligned} \quad (49)$$

De posse do momento fletor crítico pode-se calcular a tensão máxima na superfície externa do tubo pela Eq.(50) e os parâmetros da Figura (6.21). O fator de segurança é determinado pela Eq.(62) baseado na teoria de energia de distorção, onde σ_e representa a tensão de escoamento do alumínio consultada em Budynas (2008).

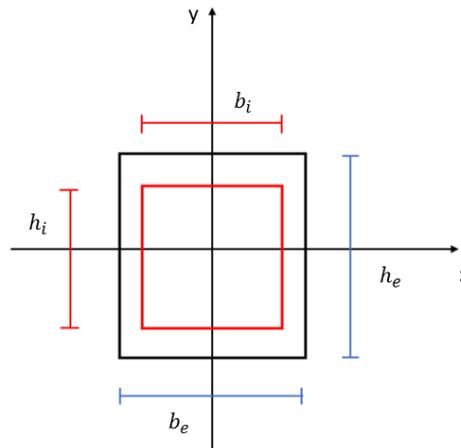


Figura 6.21 Parâmetros da seção transversal

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A} \quad (50)$$

$$I = \frac{1}{12}(b_e h_e^3 - b_i h_i^3) \quad e \quad A = (b_e h_e - b_i h_i) \quad (51)$$

$$FS = \frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \quad \sigma_e = 70MPa \quad (52)$$

Uma vez assegurado que o tubo trabalha no regime elástico, pode-se usar as equações da linha elástica para calcular a deflexão máxima do elo. Como o primeiro elo pode ser aproximado como uma viga engastada com momento aplicado, se encaixa no caso mostrado na Figura (6.22 b) onde a deflexão é calculada pela Eq.(62). Já o segundo e terceiro elo se podem ser aproximados a uma viga engastada com força aplicada, como é o caso da Figura (6.22 a) onde se pode obter a deflexão máxima pela Eq.(53).

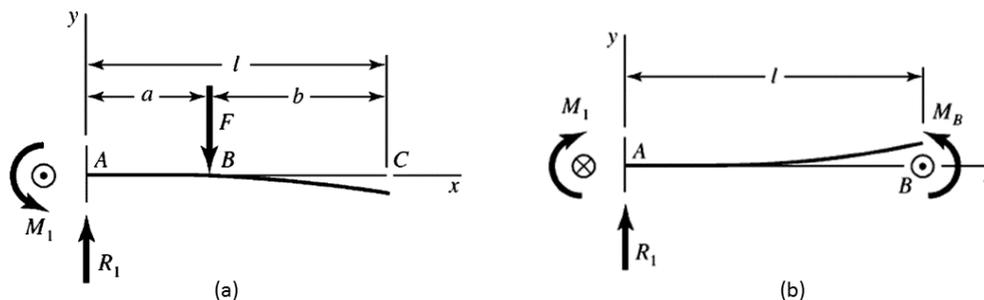


Figura 6.22 Curvas de deflexão (Budynas, 2008)

$$y_{max} = \frac{Fa^2}{6EI}(a - 3l) \quad (53)$$

$$y_{max} = \frac{M_B L^2}{6EI} \quad (54)$$

Seguindo os passos indicados para a análise dos links se optou por um perfil de 51x51mm externos com 1mm de espessura. Essa escolha foi feita para manter o espaço interno para a acomodação dos rolamento e blocos das juntas, além da maior dificuldade em se encontrar perfis menores com maior espessura durante o processo de fabricação. Assim, são apresentados na Tabela (6.5) os valores obtidos para deflexão, tensões críticas e fatores de segurança dos elos.

Tabela 6.5 Resultados da análise de rigidez

Elos	Tensão máxima	Fator de segurança	Deflexão máxima
Primeiro elo	3,86 MPa	18	0,011mm
Segundo elo	3,61MPa	19	0,038mm
Terceiro elo	0,77MPa	88	0,0023mm

6.4 PROJETO DA TRANSMISSÃO E REDUÇÃO

O sistema de transmissão selecionado é composto por polias e correias, sendo necessário o uso de correias dentadas para evitar possíveis deslizamentos entre correia e polia o que prejudicaria a confiabilidade do posicionamento do manipulador. Por motivos práticos se optou pelo uso de correia GT2 com 2mm de passo entre os dentes, essa escolha foi guiada pela facilidade de se adquirir esse modelo de correia e pelo bom funcionamento em equipamentos de solicitação de torque semelhante

como cortadoras a laser e impressoras 3D. O sistema de redução tem função de reduzir a velocidade de movimentação e multiplicar o torque na saída da redução, sendo possível a seleção de um motor com menor torque que o solicitado pela junta. No caso em questão com a seleção do motor há a necessidade de uma redução de 3:1 na primeira junta e de 2:1 na segunda junta, porém isso acarretaria uma velocidade de movimentação dos elos superior a selecionada de forma que se optou pela escolha de uma redução de 6:1 para limitar a velocidade do manipulador aos parâmetros apresentados na Tabela (6.2). Com uma redução maior se pode também reduzir a vibração da estrutura devido ao chaveamento das bobinas do motor de passo e reduzir a resolução de posicionamento do manipulador, de forma que ele ganha maior precisão de posicionamento.

6.4.1 Correias

A partir das dimensões da modelagem se definiu uma correia fechada de comprimento próximo a 280mm para o acionamento da primeira junta, dessa forma pode-se conciliar a razão da redução estipulada e a proximidade que o motor deve manter com a primeira junta para não interferir no espaço útil de trabalho. Já para a segunda junta se definiu uma correia de comprimento aproximadamente 940mm para se manter a distância entre centros próxima de 400mm, que corresponde ao deslocamento do motor. A correia da segunda junta, devido ao comprimento, pode ser do tipo interrompida pois a emenda não afeta a movimentação do manipulador.

Se optou por selecionar a correia dentada da série GT[®]2, pois é indicada pelo fabricante (SDP/SI, 2019) para baixos níveis de solicitação (potência) e baixas velocidades, sendo muito aplicada em cortadoras a laser e impressoras 3D.

Para a seleção final da correia foi feita inicialmente sua análise cinemática, usando das Eqs.(55) a (62), Consultadas em Budynas, (2008).

A relação entre as forças nos ramos da correia e o torque é dada por;

$$T = \frac{d(F_1 - F_2)}{2} \quad (55)$$

A força centrífuga atuante na redução pode ser calculada por;

$$F_c = \frac{\omega V^2}{g} \quad (56)$$

Onde ω representa a massa de 1m de correia. Por fim, temos que;

$$e^{\mu\theta} = \frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} \quad (57)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito (1, para correias dentadas) e θ o ângulo de abraçamento entre polia e correia. Para se encontrar os valores de F_1 e F_2 devemos levar em conta o tensionamento natural da correia F_i que o fabricante indica que seja próximo de 20N.

A força centrífuga tem participação muito pequena quando comparada as demais cargas, isso é devido à baixa velocidade de acionamento e baixa densidade linear da correia, podendo assim ser desconsiderada. Os ângulos de abraçamento podem ser calculados a partir das relações trigonométricas a partir dos diagramas mostrados nas Figura (6.23), (6.24) e Figura 6.14(6.14). Dessa forma, encontra-se os valores de F_1 e F_2 para cada um dos pares de polias e para a polia do eixo prismático.

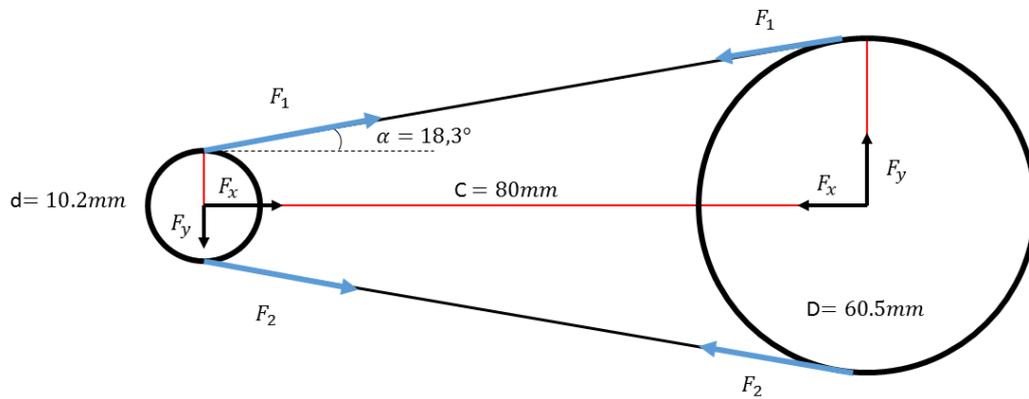


Figura 6.23 Diagrama de forças primeira junta

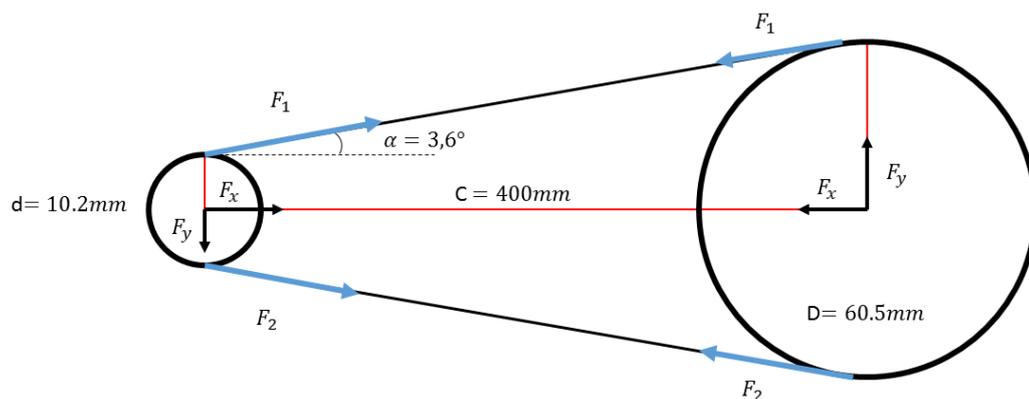


Figura 6.24 Diagrama de forças segunda junta

Os valores das forças atuantes e outros parâmetros obtidos são apresentados na Tabela (6.6).

Tabela 6.6 Parâmetros da redução

Parâmetro	1ª junta	2ª junta	3ª junta
F_1	63N	35N	29N
F_2	24N	21N	20N
F_x	82N	56N	49N
F_y	27N	4N	0
F_i	20N	20N	20N
C	80mm	400mm	200mm
θ	2,5 rad	3 rad	π rad

Temos então que a força máxima atuante na correia é de 63N, e segundo o fabricante a correia tem uma resistência a ruptura de 39N por mm de largura de face. Por motivos de facilidade para compra e

montagem se optou pela seleção de uma correia com 6mm de largura de face e 2mm de passo, dessa forma uma correia GT[®]2 com 6mm de espessura é suficientemente adequada para aplicação.

6.4.2 Polias

Para o conjunto de polias, foi selecionada a polia de 16 dentes (GT[®]2-16T-6mm) fabricada em alumínio sendo compatível com o modelo de correia selecionado e com furo interno de 5mm para acoplamento no motor de acionamento. A polia movida será fabricada em polímero ABS e possui um total de 95 dentes, realizando uma redução próxima de 6:1. Para a análise de resistência dos dentes de cada polia se aproximou o carregamento como o de uma viga engastada, para isso foi consultada a geometria do perfil da correia selecionada Figura (6.25) e montado o modelo mostrado na Figura (6.26), onde se assume que a carga transmitida para a polia é suportada por 30% dos dentes acoplados como sugerido em Budynas, (2008).

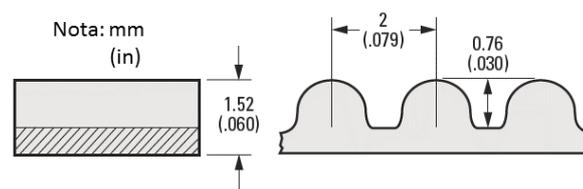


Figura 6.25 Perfil da correia selecionada

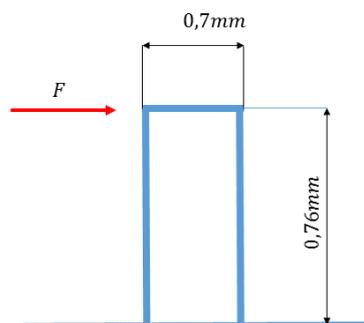


Figura 6.26 Modelo de carregamento

Assim temos o valor da força F aplicada a um dente a partir da Eq.(58). Onde N representa o número de dentes em contato com a correia que pode ser obtido pelo ângulo de abraçamento da correia.

$$F = (F_1 - F_2) \quad (58)$$

Assim temos na Tabela (6.7)Tabela 6.7 os valores encontrados para força F e o número de dentes que realmente suportam a carga.

Realizando uma análise similar a dos elos para as polias, temos na Tabela (6.7) os resultados de tensão máxima, deflexão máxima e fator de segurança baseado na teoria de energia de distorção (Budynas, 2008). Para os valores de modulo de elasticidade ($E = 1335 \text{ MPa}$) e de tensão de

escoamento ($\sigma_e = 14,7\text{MPa}$) do polímero ABS após a impressão 3D, foram consultadas as informações do fabricante (3DLAB, 2019).

Tabela 6.7 Parâmetros de carregamento das polias

Polia	Primeira junta		Segunda junta		Eixo Z
	Motora	Movida	Motora	Movida	Motora
F	20N	2,8N	7,0N	1,0N	4,0N
Dentes carregados	2	17	3	15	3
Tensão máxima	31MPa	4,5MPa	10,8MPa	1,6MPa	6,2MPa
Fator de segurança	2,3	3,2	6,4	9,5	11,3
Deflexão do dente	0,013mm	0,002mm	0,005	0,0006mm	0,0026

Dessa forma vemos que as polias atendem bem a aplicação, já que as deflexões dos dentes são da ordem de centésimos de milímetro e os fatores de segurança são todos maiores que 2.

6.4.3 Fixação e tensionamento

Para o sistema de montagem e tensionamento das correias foi desenhado um suporte de motor específico para permitir o deslizamento do atuador e por consequência o tensionamento da correia. O suporte pode ser visto na Figura (6.27) e é fabricado em polímero ABS que reduz também a transmissão de vibração do motor para a estrutura. Para a correia interrompida usada no acionamento da segunda junta, além do suporte com ajuste de posição para o motor, foi desenhado também um fixador para unir as extremidades da correia interrompida, esse fixador é apresentado na Figura (6.28). Já para a junta prismática foi desenhado um fixador montado nas extremidades da junta linear de forma a unir as extremidades das barras guia com o movimento da correia. A Figura (6.29) mostra o sistema de fixação da correia na junta prismática.

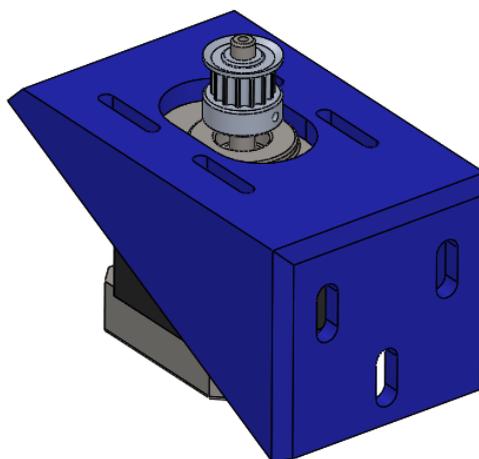


Figura 6.27 Suporte tensionador junta 1



Figura 6.28 Fixador correia interrompida

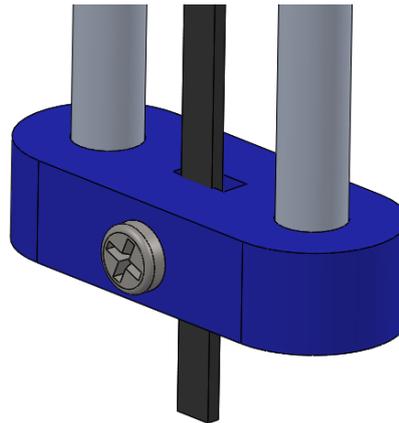


Figura 6.29 Fixador correia eixo Z

6.5 PROJETO DE EIXOS

Além dos elos, os eixos também podem proporcionar erros no posicionamento do manipulador, principalmente associados a deflexões, o que aumenta o desvio do paralelismo dos eixos. Dessa forma os eixos foram dimensionados para manter a deflexão angular baixa e para que não houvesse escoamento. Os eixos não foram dimensionados para fadiga ou velocidade crítica pois a velocidade e o número de ciclos são muito baixos (<15rpm). Para que se obtenha a possibilidade de comprimir a junta para a redução de folgas, será selecionado um parafuso de rosca parcial para substituir o eixo com ponta usinada.

6.5.1 Escoamento

Primeiramente foi desenhado o diagrama de corpo livre dos eixos das juntas rotativas (sendo o mesmo diagrama para ambos os eixos, variando apenas os parâmetros de cargas e comprimentos), como mostra a Figura (6.30), onde as componentes nos mancais (R_1 e R_2) são responsáveis por equilibrar o momento gerado pelo peso da estrutura (P).

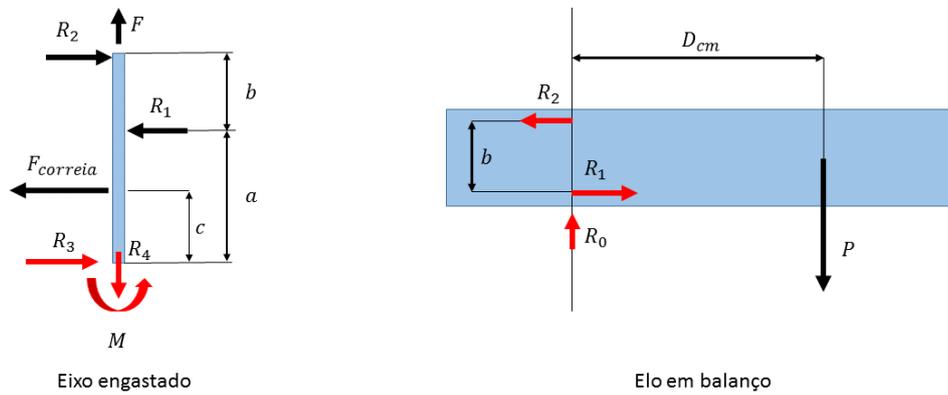


Figura 6.30 Diagrama de corpo livre eixos

Aplicando as equações de equilíbrio para o elo e posteriormente para o eixo temos os resultados das reações para as duas primeiras juntas. A partir das reações encontradas foi aplicado o equilíbrio de forças e momentos em um corte transversal ao longo dos eixos, de forma a se obter os diagramas de momento fletor apresentados nas Figura (6.31) a (6.34).

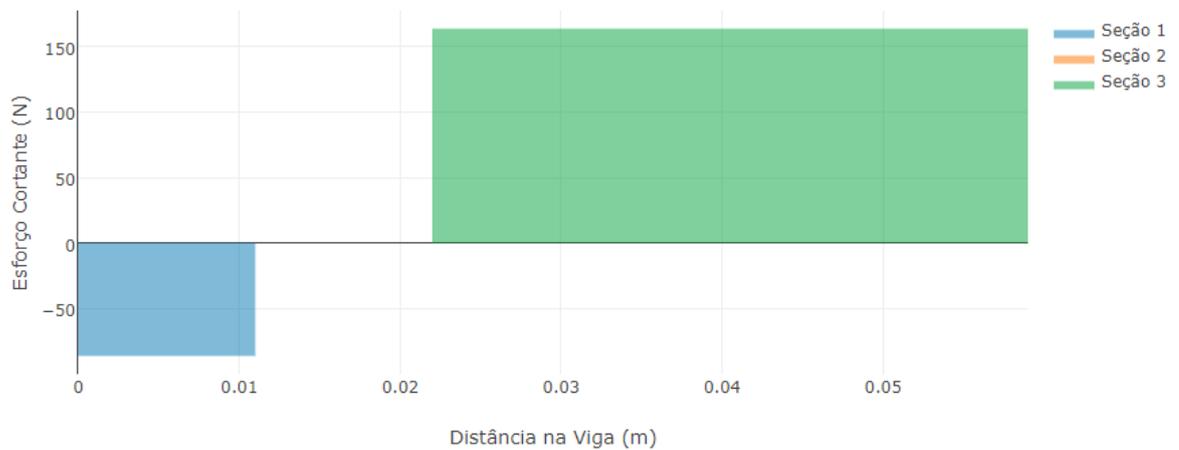


Figura 6.31 Esforço cortante primeiro eixo

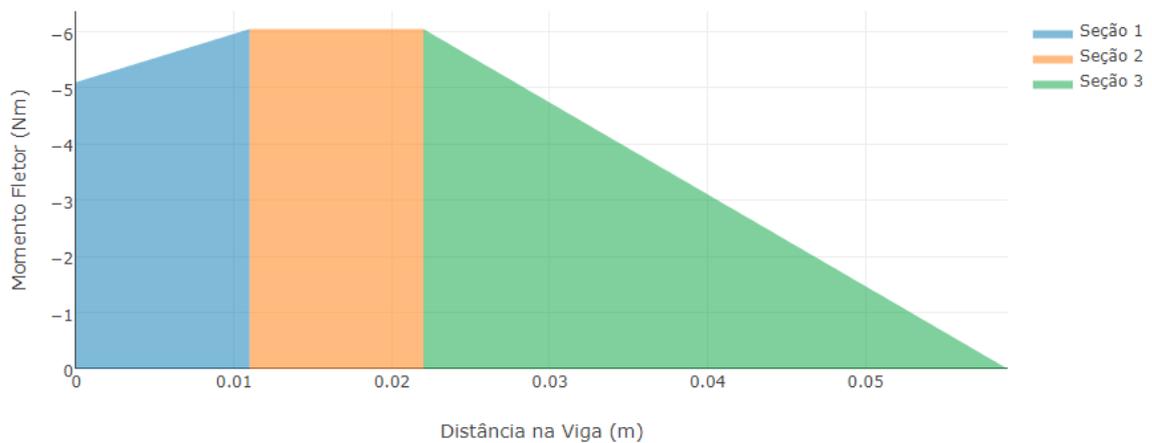


Figura 6.32 Momento fletor primeiro eixo

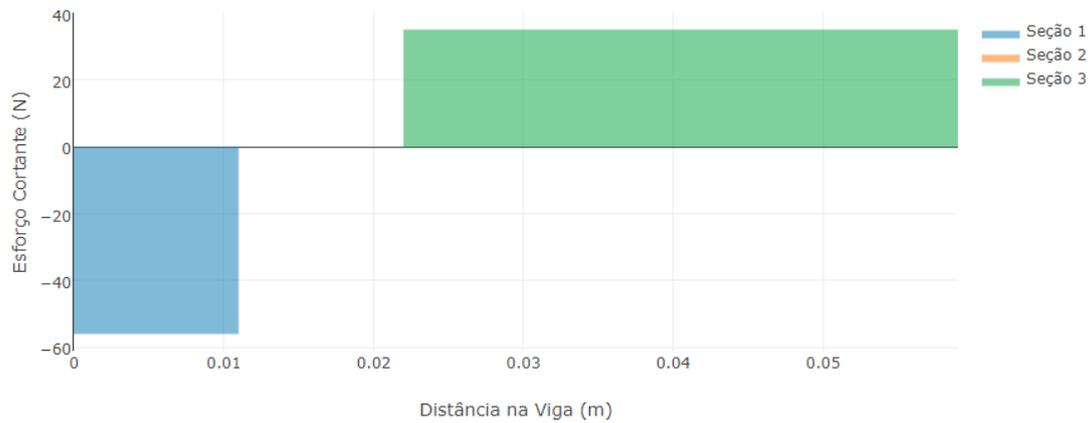


Figura 6.33 Esforço cortante no segundo eixo

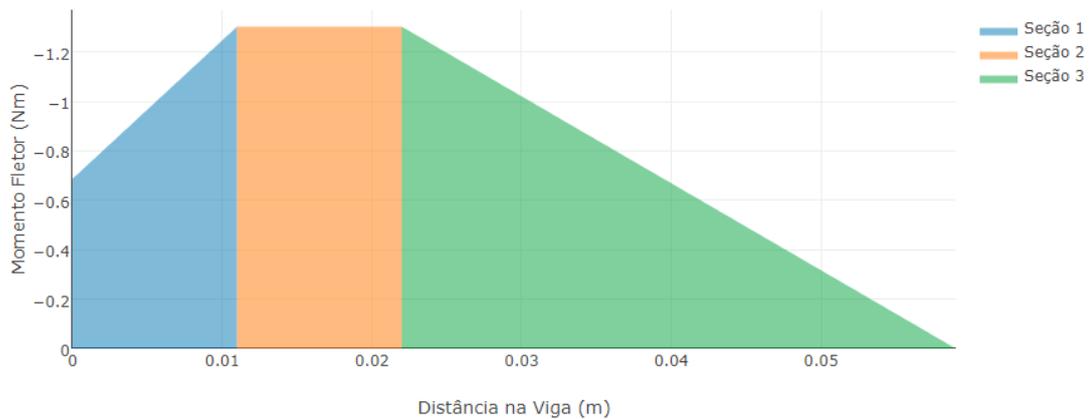


Figura 6.34 Momento fletor no segundo eixo.

As tensões em um elemento localizado na superfície de um eixo circular sólido sujeito a um carregamento de flexão e tração, são dadas por Budynas (2008) como:

$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d^3} + \frac{8F}{\pi d^2} \quad (59)$$

$$FS = \frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \quad (60)$$

Os resultados obtidos foram baseados nas propriedades mecânicas para parafusos métricos de aço de baixo e médio carbono de classe 4,6 consultados em Budynas (2008). Os valores consultados são apresentados na Tabela (6.8) e os resultados dos obtidos na Tabela (6.9).

Tabela 6.8 Parâmetros para análise dos eixos

	a	b	c	D _{cm}	P	F	σ_e	E
1° eixo	22mm	37mm	11mm	205mm	29,5N	200N	240MPa	205GPa
2° eixo	22mm	37mm	11mm	74mm	17,6N	200N	240MPa	205GPa

Tabela 6.9 Resultados da análise dos eixos

	\emptyset	R1	R2	R3	R4	F _{correia}	M	σ_{max}	FS
1º eixo	10mm	163,5N	163,5N	86N	200N	86N	5,1Nm	54MPa	4,4
2º eixo	10mm	35,2N	35,2N	56N	200N	56N	0,7MPa	9,5Mpa	25

Dessa forma foi selecionado um eixo de diâmetro de 10mm com comprimento de 150mm, sendo 90mm engastados com interferência no primeiro elo que se encontra fixado na base. Para a compressão da junta surge a necessidade do eixo ser tracionado, de forma que foi selecionado um parafuso M10 classe 4,6 com comprimento total de 150mm e rosca parcial para não haver concentradores de tensão na região externa ao engaste. O modelo selecionado é mostrado na Figura (6.35).



Figura 6.35 Parafuso M10 com rosca parcial

6.5.2 Deflexão

Foi feito também a verificação do dimensionamento do eixo de forma a manter a deflexão na ponta do manipulador abaixo de 1mm, para isso foi calculado o desvio da linha elástica para cada uma das cargas atuantes no eixo e combinadas com o princípio da sobreposição, que é válido no regime elástico, conforme feito anteriormente no dimensionamento dos elos. Com base nas Figura (6.22 a) e na Eq.(53) foram calculadas as deflexões em cada eixo e a sua influência na deflexão do fim da cadeia cinemática, como mostra a Tabela (6.10).

Tabela 6.10 Deflexões dos eixos

	Y_{max}	θ_{max}	Efeito na extremidade do elo ($L \cdot \theta_{max}$)
Eixo primeira junta	0,01mm	0,0013 rad	0,3mm
Eixo segunda junta	0,0026mm	0,00028 rad	0,05mm

6.6 SELEÇÃO DE MANCAIS

Para que as conexões entre os elos possam deslizar de forma livre foram selecionados rolamentos de esferas para intermediar o contato entre os elos e demais peças com movimento relativo, como é o caso da correia interrompida usada no eixo prismático.

Para a montagem dos blocos no interior dos elos foram selecionados rolamentos radiais de esferas de pista simples, pois eles suportam muito bem cargas radiais e certo nível de cargas axiais. O rolamento

foi selecionado com base no diâmetro do eixo, visto que a aplicação de um eixo escalonado com rolamento de diâmetro reduzido na extremidade criaria dificuldades na montagem. Dessa forma foi selecionado o rolamento 6200ZZ, mostrado na Figura (6.36).

Para intermediar o contato entre a superfície dos tubos foi selecionado o rolamento axial de esferas 51102 (Figura 6.36), onde os critérios para a seleção foram mais uma vez o diâmetro interno e a área de contato que ele propicia para a distribuição da carga e não a carga axial que ele deveria suportar.

Foram selecionados, para a aplicação de desvio da correia aberta na junta prismática, os rolamentos F623ZZ (Figura 6.36) devido a seu tamanho reduzido, largura de face compatível com a da correia e a flange lateral, que impede a correia de entrar em contato com outras peças que não o rolamento. Por fim foi selecionado o rolamento linear LM10UU (Figura 6.36), para intermediar o movimento linear do eixo Z.

Visto que a aplicação envolve pequenas cargas a seleção dos rolamentos foi feita a partir das condições dimensionais do projeto e posteriormente verificada a compatibilidade com a aplicação e estimadas suas vidas úteis. Para a seleção e estimativa da vida dos rolamentos foi consultado o catálogo da fabricante (NSK, 2019) onde se obteve acesso as equações para a seleção dos componentes.



Figura 6.36 Rolamentos selecionados

No catálogo da fabricante ele expõe os parâmetros analisados para a seleção e cálculo da vida dos rolamentos. Na metodologia de seleção de rolamento de esferas o fabricante define a relação entre a vida em milhões de rotações (L), a carga dinâmica equivalente no mancal (P) e a capacidade de carga dinâmica (C) do modelo conforme mostrado na Eq.(61).

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (61)$$

Para o cálculo da carga dinâmica equivalente são usados os coeficientes X e Y consultados no catálogo. Esses coeficientes balanceiam a carga dinâmica equivalente com base na razão (e) entre a carga axial (F_a) e a carga radial necessárias ao mancal (F_r), essa relação é mostrada na Eq.(62).

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (62)$$

Consultando a capacidade de carga do rolamento (C) e calculando a carga equivalente pela Eq. pode-se estimar a vida útil do rolamento em milhões de rotações. Com os dados consultados foram obtidos os resultados da Tabela (6.11).

Tabela 6.11 Estimativa de vida dos rolamentos

	6200zz – 1ª junta	6200 – 2ª junta	51102	F623ZZ
F_r (N)	163,5N	35,2N	0	41N
F_a (N)	200N	200N	200	0
P (N)	282	218	200	41
C (N)	5100N	5100N	10500N	460N
L (10^6 rotações)	5915	12800	150700	1412

6.7 SELEÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Para ao acionamento do manipulador foram selecionados os motores compatíveis com a solicitação de cada junta. Por se tratarem de motores de passo foi necessária a seleção de módulos para realizar o chaveamento das bobinas e de uma placa controladora para controlar a movimentação do manipulador. Para as juntas foram selecionados motores de passo NEMA 17 bipolares com diferentes correntes e torques de operação. Na Tabela (6.12) são apresentados os motores indicados para cada uma das juntas.

Tabela 6.12 Motores selecionados

Junta	Torque do motor	Passos por	Corrente de operação	Identificação
1	(0,41Nm) 4,2 kgf cm	200	1,7A	42HS40-1704-13A
2	(0,31Nm)3,2 kgf cm	200	1,5A	17HD34008-22B
3	(0,41Nm)4,2 kgf cm	200	1,7A	42HS40-1704-13A

Para o chaveamento das bobinas dos motores foi selecionado o driver A4988 muito usado para controle de motores bipolares por apresentar maior possibilidade de divisão dos passos do motor, variando desde passo completo até a divisão em 16 micro passos controlados por PWM entre os passos existentes. Além disso ele possui ajuste de corrente por meio de um potenciômetro e é compatível com uma variedade de microcontroladores. O modulo também apresenta um excelente custo benefício e praticidade de acionamento de motores, uma imagem do modulo é apresentada na Figura (6.37).

Para a seleção do microcontrolador a ser usado foram avaliados aspectos como custo, acessibilidade e praticidade, sendo assim selecionado o microcontrolador Arduino UNO (Figura 6.38) principalmente pelos critérios de acessibilidade e baixo custo, tendo também como vantagem a existência de uma placa (Figura 6.39) que intermedia a conexão entre o microcontrolador e dispositivos como motores, sensores

e módulos de chaveamento. A placa de conexão usada é o modelo CNC Shield V3 e é apresentada na Figura(6.39).



Figura 6.37 modulo A4988



Figura 6.38 Microcontrolador Arduino UNO

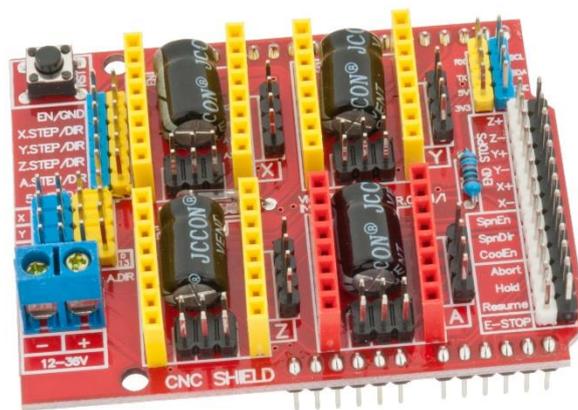


Figura 6.39 Placa CNC Shield V3

7 PROJETO DE DETALHAMENTO

Neste capítulo serão apresentados os passos finais do projeto, abordando a etapa de construção e testes bem como as recomendações de uso e apresentação dos resultados do manipulador.

7.1 Lista de materiais

Com o projeto finalizado foi montada a lista de materiais para a construção e feita uma estimativa de custo, contabilizando custo de material serviços de corte e usinagem e mão de obra. A lista de materiais é apresentada na Tabela (7.1).

Tabela 7.1 Lista de materiais

MATERIAL	Qtd	Total	Fornecedor
Correia GT2 6mm 280mm	1	R\$ 15,00	TD TEC
Correia Aberta GT2 6mm 2m	1	R\$ 23,00	TD TEC
Perfil aluminio 51x51x1mm	1	R\$ 30,00	Alumividros
Barra circular de aluminio Ø10mm x1m	1	R\$ 15,00	Leroy merlin
Rolamento radial 6200 zz	4	R\$ 40,00	CCP
Rolamento axial 51102	2	R\$ 30,00	Mercado Livre
Rolamento F624zz	4	R\$ 36,00	TD TEC
Polia GT2 16 dentes	3	R\$ 45,00	TD TEC
Rolamento LM10UU	4	R\$ 40,00	TD TEC
Nema 17 - 1,7 A - 4,2 kgf*cm	2	R\$ 180,00	Filipeflop
Nema 17 - 1,5 A - 3,2 kgf*cm	1	R\$ 75,00	Filipeflop
Filamento ABS 1KG	1	R\$ 95,00	3D fila
MDF 15mm 500x500mm	1	R\$ 18,00	Leroy merlin
Parafuso M10 150mm rosca parcial	2	R\$ 10,00	CCP virtual
Parafusos de rosca soberba Ø4mm x20mm	50	R\$ 5,00	CCP virtual
Arduino UNO	1	R\$ 65,00	TD TEC
CNC Shield V3	1	R\$ 55,00	TD TEC
Driver A4988	4	R\$ 60,00	TD TEC
Horas de impressão	43	R\$ 430,00	LAB
Horas de usinagem	5	R\$ 400,00	LAB
TOTAL		R\$ 1.667,00	

7.2 MONTAGEM E RESULTADOS

Com o projeto finalizado e de posse da lista de materiais foi dado início a fabricação, esta etapa foi composta pela compra de componentes comerciais como polias, correias e parafusos, dentre outros. Contando também com peças usinadas em MDF e alumínio, como o contorno para o engaste do primeiro

elo (Figura 6.4). Foi composto também pela fabricação de várias peças em polímero ABS a partir de impressão 3D, como é o caso dos blocos internos dos elos, suportes de motores, e do suporte de deslizamento do eixo Z.

Anterior a fabricação, foram realizados testes de tolerâncias dimensionais tanto para a impressão em polímero como para a usinagem na fresadora CNC, um exemplo desse teste foi a impressão do trecho de seção (Figura 7.1) para verificar qual a mínima folga necessária para o deslizamento do bloco no interior do tubo.

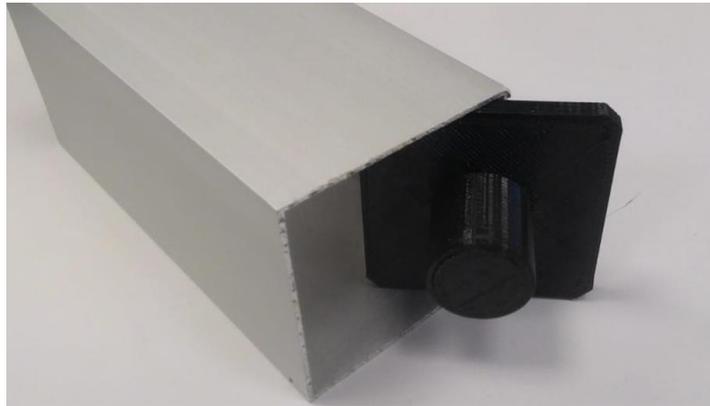


Figura 7.1 Teste de tolerância para blocos da junta

Após os testes foi possível atribuir a tolerância para a fabricação das peças, essas tolerâncias foram assim indicadas nos desenhos técnicos presentes no apêndice B. Com a fabricação finalizada foi então montado o manipulador que é apresentado nas Figura (7.2) e (7.3).

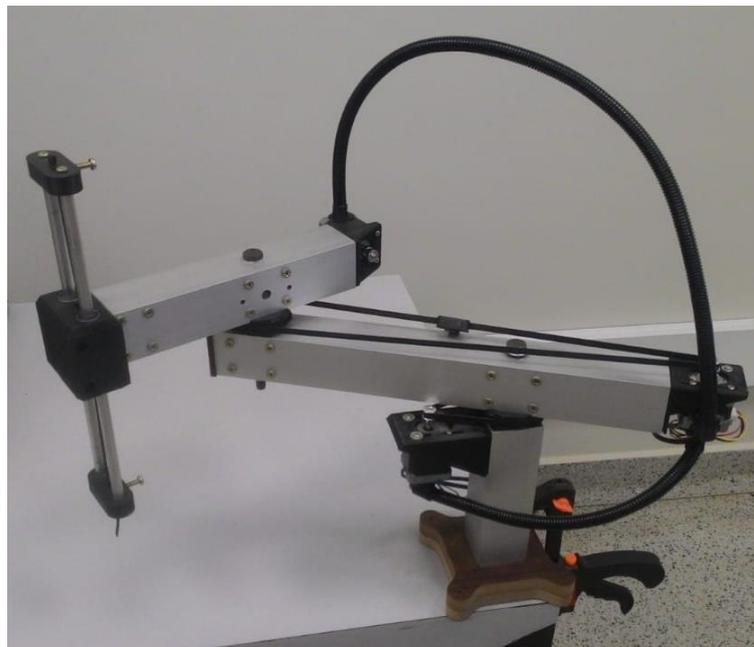


Figura 7.2 Manipulador montado

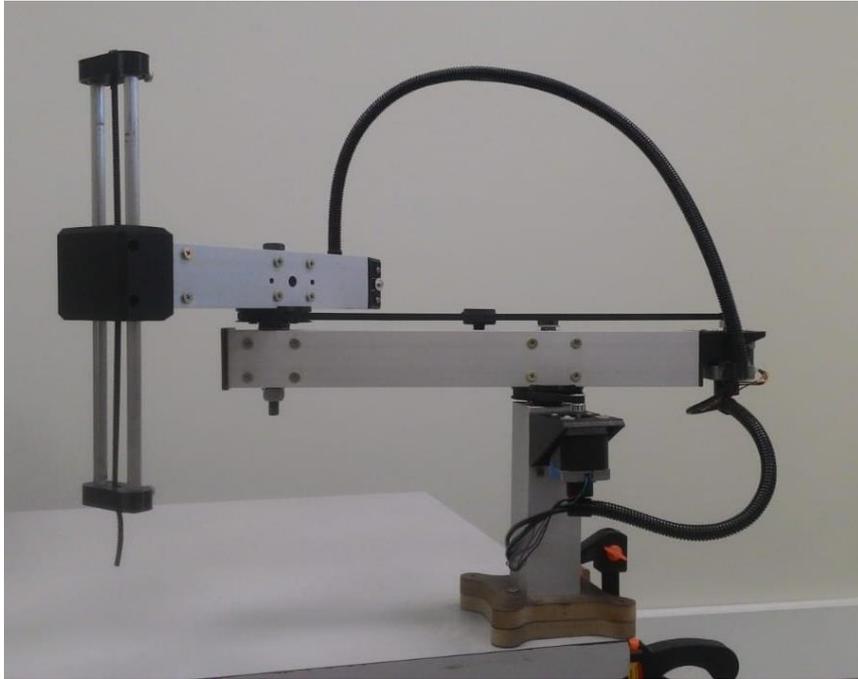


Figura 7.3 Manipulador montado 2

Com a montagem concluída foram realizadas as medições de perpendicularidade entre as superfícies com ferramentas manuais como paquímetros e esquadros (Figura 7.4), mostrando que o manipulador visualmente está dentro dos desvios estipulados de deflexão e paralelismo.



Figura 7.4 Teste de perpendicularidade entre superfícies

Para a confirmação da precisão de posicionamento do manipulador foi também desenvolvida uma rotina no programa MATLAB para o cálculo da cinemática inversa pelo método geométrico apresentado na Seção 22. A rotina tem como entrada os valores da posição cartesiana no espaço de trabalho, a partir dos quais executa a cinemática inversa e obtém os valores das coordenadas de junta que são convertidos em número de passos que cada junta deve executar. Esses dados então são enviados para uma placa de microcontrolador Arduino UNO onde são executados os movimentos com velocidade e aceleração já

definidos no microcontrolador por meio de uma função da biblioteca AccelStepper. Foram então realizadas as medições do posicionamento do manipulador.

7.3 MANUTENÇÃO

Para garantir o bom funcionamento do manipulador conforme projetado, faz-se necessário manter uma regularidade de inspeção e manutenção para que falhas durante a operação não ocorram e para que possíveis defeitos sejam identificados antes que prejudiquem o sistema. Dessa forma, indica-se a realização de uma manutenção preventiva periódica para verificar as condições do robô. Primeiramente, recomenda-se que as inspeções e eventuais reparos necessários sejam sempre devidamente registrados e salvos. As inspeções a serem realizadas podem ser feitas de forma visual ou com o auxílio de instrumentos. Alguns sinais podem indicar possíveis problemas no sistema, fazendo-se importante ter atenção a eles. Sinais comuns são na forma de ruído, vibração, ou aquecimento excessivo de algum componente do manipulador.

Alguns pontos de inspeção foram listados baixo.

- Tensão das correias (Verificação semanal)

A correta tensão aplicada nas correias é fundamental para evitar problemas durante a operação. Uma correia muito tensionada contribui para atrito excessivo e perda de potência na transmissão, já uma correia frouxa pode causar saltos, imprecisões de posicionamento e intensificar seu próprio desgaste.

- Verificação de folgas dos fixadores

Conforme o uso do manipulador, podem surgir folgas nos parafusos responsáveis por manter a junta alinhada e nos parafusos de fixação dos motores, podendo dar origem a baixa tensão nas correias e a danos em componentes mais próximos as uniões.

- Verificar alinhamento das polias

Com o acionamento do manipulador, é natural que surjam folgas com o passar do tempo, podendo surgir um desalinhamento entre as polias o que deve ser corrigido para não intensificar o desgaste da correia pelo atrito excessivo com a borda da polia.

- Verificar lubrificação dos rolamentos

Embora a maioria dos rolamentos da estrutura sejam vedados, os rolamentos lineares para a movimentação do eixo prismático precisam ser lubrificados com frequência e com o lubrificante adequado a sua aplicação (graxa branca para ambientes limpos e óleos para ambientes com concentração de partículas), um sinal de má lubrificação é o surgimento de ruídos durante a movimentação.

- Deformação plástica de peças

Devido a uma variedade de peças do manipulador serem fabricadas de polímero esse pode se deformar plasticamente com a sobrecarga de alguns componentes, e com o aumento da temperatura do manipulador. O polímero ABS é característico por apresentar variação de cor quando deformado plasticamente, por esse motivo foi selecionada a cor preta, para facilitar a identificação de tais defeitos. Assim que observado a deformação de peças estas devem ser substituídas.

CONCLUSÃO

O presente projeto teve como objetivo a construção de um manipulador didático com morfologia SCARA, para isso foi aplicada a metodologia de desenvolvimento de projeto de Pahl, et al. (2007) que possibilitou guiar a execução de cada uma das etapas do projeto, e com isso foi desenvolvido um manipulador com grande volume de trabalho (quando comparado com outros manipuladores SCARA comerciais) tendo como limite inferior e superior os círculos de 100mm e 420mm de raio. Embora tenham surgido dificuldades no projeto, principalmente devido a fabricação, todos eles foram contornados. Os resultados obtidos mostram que a estrutura do manipulador é suficientemente robusta para a aplicação em sala de aula, sendo operado por estudantes em fase de aprendizado ou pesquisa, visto que os fatores de segurança foram mantidos todos acima de 2. A estrutura se mostra rígida e com deflexões abaixo de 2mm em relação a horizontal, contando com baixa resolução (0,3mm no posicionamento na extremidade do manipulador no plano XY e 0,04° nas juntas rotativas) o que permite o alcance de maior número de posições. Além dos bons resultados obtidos a construção é simplificada e facilita a manutenção já que grande número de peças foram feitas com impressão 3D e com materiais comerciais de fácil acesso. Como melhorias para o manipulador ficam, a instalação de sensores de posição nas juntas de forma a aplicação de controle em malha fechada, a instalação de uma botoeira de parada imediata ligada com a fonte de alimentação e a criação de uma interface homem máquina (IHM) para o acionamento do manipulador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRIENTOS, Antonio, et al. Fundamentos de Robótica. 2.ed. Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- BOLTON, W. Engenharia de controle. 1.ed. São Paulo: Makron Books, 1995.
- BUDYNAS, Richard G.; Nisbett, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. 8.ed. São Nova York: McGraw-Hill, 2008.
- CHENG, Lin Chih; Melo, Leonel. QFD Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Robotização é saída para aumento de produtividade. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/agenciacni/noticias/2017/05/robotizacao-e-saida-para-aumento-de-productividade/>>. Acesso em: 28 agosto 2018.
- DOBOT, DOBOT M1, 2018. Disponível em: < <https://www.dobot.cc/dobot-magician/product-overview.html> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Machine components. Disponível em: < <https://www.britannica.com/technology/Harmonic-Drive>>. Acesso em: 05 setembro 2018.
- FLUX INTEGRATION, FLX ARM S16.Z8, 2018. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/535786699/flxarm-low-cost-precision-robotic-arm> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- FURTADO, Renato Azevedo Cossich. Retrofit mecânico de um robô manipulador didático. 2017. 135f. Bacharel em Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília, Brasil.
- GRAVIA. Catalogo técnico. Disponível em: < <https://www.gravia.net.br/grupo/catalogos>>. Acesso em: 17 setembro 2018.
- HEBI ROBOTICS, 4DOF SCARA ARM KIT, 2018. Disponível em: < <https://www.hebirobotics.com/robotic-kits/> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- INTERBOTIZ LABS, WIDOW X ROBOT ARM, 2018. Disponível em: < <http://www.trossenrobotics.com/widowxrobotarm> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- INTERBOTIZ LABS, WIDOW XL ROBOT ARM, 2018. Disponível em: < <http://www.trossenrobotics.com/WidowXL-Robot-Arm> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. Robot density rises globally. 2017. Disponível em: <<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-rises-globally>>. Acesso em: 28 agosto 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8373: Robots and Robotics Devices – Vocabulary. England, 2012. 38 p.
- JJROBOTS. Robotic arm SCARA. 2017. Disponível em: < <https://www.jjrobots.com/robotic-arm-scara-project-updates/>>. Acesso em: 13 setembro 2018.

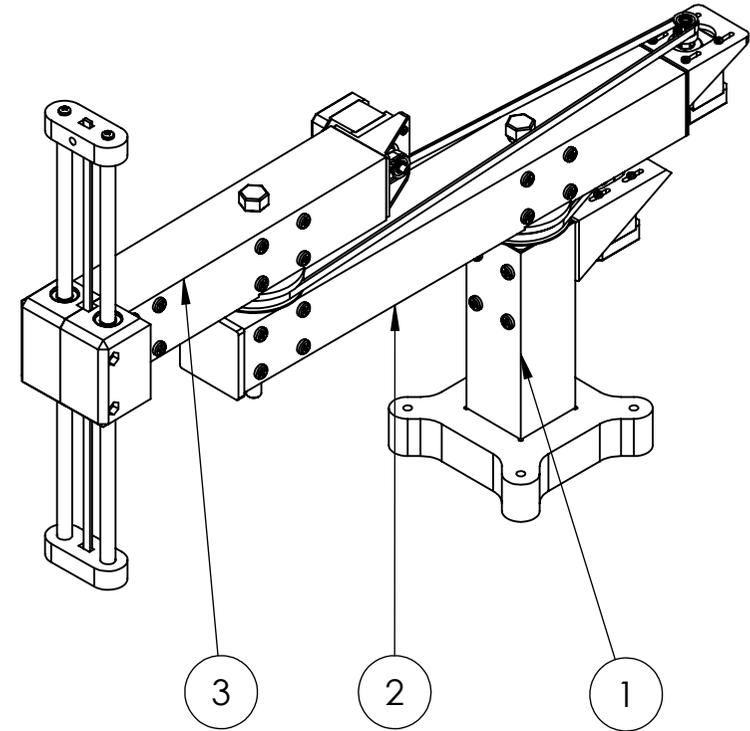
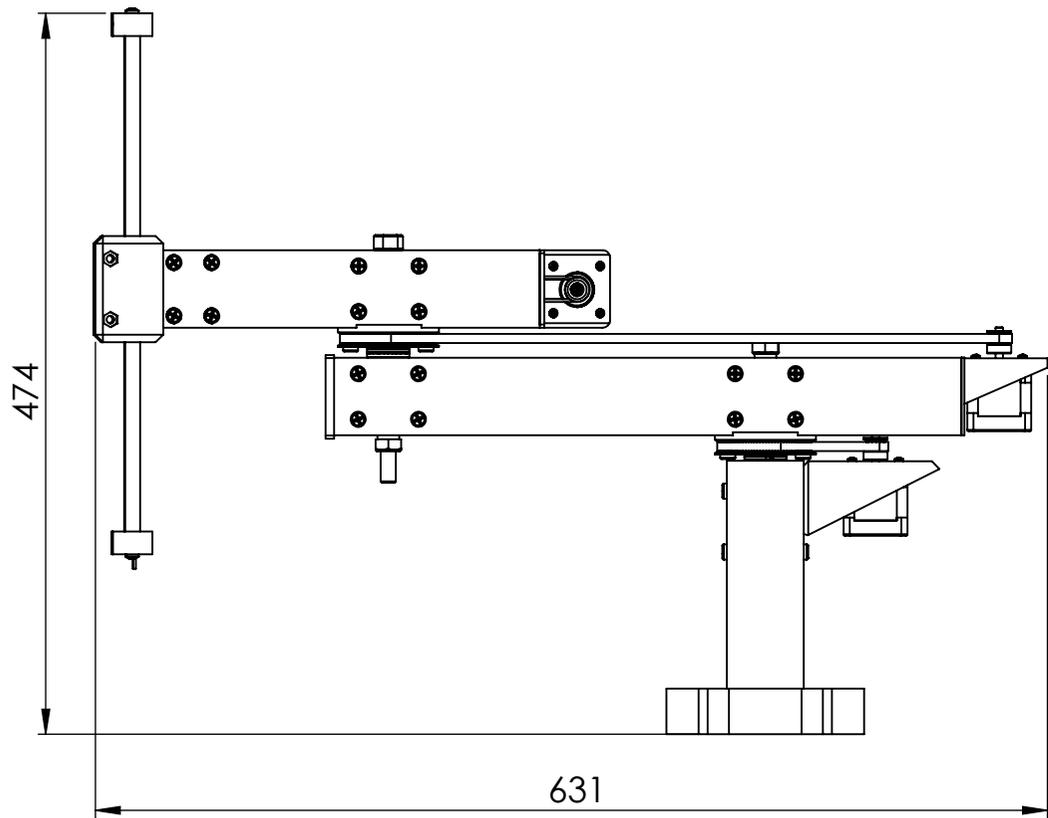
- LOVEBIRDS, hobby store. IRB 460 industrial robotic arm model Axis palletizing. 2018. Disponível em: < <https://pt.aliexpress.com/item/ABB-irb-460-Industrial-robotic-arm-model-Axis-palletizing-CNC-4-DOF-manipulator-model-for-Teaching/32566644458.html?spm=a2g03.10010108.1000016.1.305076946VqAuV&isOrigTitle=true> >. Acesso em: 28 agosto 2018.
- MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. A future that works: automation, employment, and productivity. Mckinsey & Company 2017.
- MADUREIRA, Omar Moore. Metodologia do projeto. Planejamento, execução e gerenciamento. Primeira edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.
- MAKERARM, MAKERARM, 2018. Disponível em: < <https://www.kickstarter.com/projects/1849283018/makerarm-the-first-robotic-arm-that-makes-anything> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- MAKINO, Hiroshi. Development of the SCARA. Journal of Robotics and Mechatronics. Tokyo, Vol. 26, No. 1, janeiro de 2014.
- MELLO, Marconi Silva Vaz. Análise de Desempenho e melhorias em robô manipulador. 2016. 116f.. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação – Universidade de Brasília, Brasil.
- MELLO, Otávio Pellicano Moreira. Desenvolvimento de um Robô Manipulador SCARA. 2016. 67f.. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação – Universidade de Brasília, Brasil.
- MERIAM, J. L.: KRAIG, Mecânica para engenharia, Dinâmica. Vol.2. 6ed. Tradução e revisão técnica por José Luis Lopes da Silveira. Rio de Janeiro: LTC. 2009.
- NETO, Miguel Barreto da Silva, et al. Development and control of a prototype type SCARA and gantry applied to educational robotics. 2015. 8f. Instituto federal de educação – Pernambuco, Caruaru, Brasil.
- NORTON, Robert L. Projeto de máquinas, uma abordagem integrada. 4ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NSK. *Catálogo Geral NSK*. Disponível em: <[http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf)>. Acesso em: 07 junho 2019. Nenhuma citação no texto.
- PAHL, Gerhard, et al. Engineering design: a systematic approach. 3.ed. London: Springer-Verlag, 2007.
- PRECISE AUTOMATION, PF34400ICSR, 2018. Disponível em: < <http://www.proudco.com/index.php/precise-automation-cobots/> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- REIS, Wattyllas Ferreira. Desenvolvimento de um robô manipulador didático. 2015. 99f.. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação – Universidade de Brasília, Brasil.
- REPRAP. Prototype SCARA robot arm. Disponível em: < <https://reprap.org/forum/read.php?185,291292> > Acesso: 29 setembro 2018.
- ROBOTDIGG, 4 AXIS SCARA ARM ROBOT, 2018. Disponível em: < <https://www.robotdigg.com/product/1041/4-Axis-Scara-Arm-Robot> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- ROCHA, Edrysson Sebastien Araujo. Análise de Desempenho e Controle de um Robô SCARA. 2016. 67f.. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação – Universidade de Brasília, Brasil.

- SEBRAE. Saiba o que é a indústria 4.0 e as oportunidades que ela gera. 2016. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/saiba-o-que-e-a-industria-40-e-descubra-as-oportunidades-que-ela-gera,11e01bc9c86f8510VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 28 agosto 2018.
- SHARIATEE, Morteza, et al. Design of an Economical SCARA Robot for Industrial Applications. 2014. 6f.. Bacharel em Engenharia Mecânica - Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- URREA, Claudio; CORTÉS, Juan; PASCAL, José. Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom . 2016. 9f. Universidade de Santiago do Chile, Chile.
- TELECURSO 2000, PROFISSIONALIZANTE. ELEMENTOS DE MÁQUINA. SÃO PAULO. 1997. 159P.
- SAHARI, Khairul Salleh Mohamed, et al. Design and development of a 4-do SCARA robot for educational purposes. 2011.24f. Graduation in Mechanical Engineering – Universiti Tenaga Nasional, Malaysia.
- SANYO DENKI. Catálogo de motores. Disponível em : < https://www.sanyodenki.us/contents/product_information/sanmotion/5-phase_stepping_systems/sanmotion_f5.html>. Acesso em: 13 setembro 2018.
- SDP/SI , Catalogo de correias dentadas. Disponível em : < <https://sdp-si.com/products/timing-belts/gt2.php>>. Acesso em: 13 maio 2019.
- SHARIATEE, Morteza, et al. Design os an economical SCARA robot for industrial applications. 2014. Mechanical Engineering Department – University of Mashhad, Irã.
- TDTEC, Fuso trapezoidal 8 mm. Disponível em: < <https://www.tdtec.com.br/produto/3x-fuso-trapezoidal-tr8-passo-8-300mm-c-1-flange-de-latao/413552>>. Acesso em: 13 setembro 2018.
- TZT, Robô SCARA, 2018. Disponível em: < <https://pt.aliexpress.com/item/SCARA-Robot-Mechanical-Arm-Hand-Manipulator-4-Axis-Stepper-Motor-Assembled/32807670792.html> >. Acesso em : 11 outubro 2018.
- ROBOTDIGG, SCARA SERVO, 2018. Disponível em: < <https://pt.aliexpress.com/item/SCARA-Robot-Mechanical-Arm-Hand-Manipulator-4-Axis-Stepper-Motor-Assembled/32807670792.html> >. Acesso em : 15 outubro 2018.
- 3DLAB. Propriedades mecânicas filamento ABS. Disponível em : < <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 13 maio 2019.

APÊNDICE A

Qualidade exigida / Características da Qualidade - nenhuma relação 1 Baixa relação 3 Alguma relação 9 Alta relação			Nível 3	Propriedades Físicas										Características Mecânicas					Eletrônica										
			Nível 2	Insumos	Dimensão		Peso	Rigidez		CG	Base				Acab.	Resistência	Transmissão	Fabricação	Sensor	Controlador	Motor								
			Nível 1		Custo de material	Custo de Fabricação	Altura do Manipulador	Largura do Manipulador	Comp. do Manipulador	Peso do Manipulador	Deflexão do Manip.	Dilatação do Manip.	Distância do C.G. à Base	Planeza da sup.	Peso da Base	Largura da Base	Comprimento da Base	Visual (Estética)	Carga de trabalho	Resistência a flexão	Folga Angular	Desvio de fabricação	Aterramento	Resolução dos sensores	Vel. de Processamento	Torque dos atuadores	Aceleração \ Velocidade	Peso do Atuador	Fácil Manutenção
			Nota: 1 a 5	R\$	R\$	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm		N	mm	mm	S/N	Kg		min. de arco								horas	
Custo	Acessibilidade	Uso de componentes comerciais	5	9	9	0	0	0	1	3	3	0	3	1	0	0	3	1	3	3	9	0	3	3	3	3	3	1	
		Uso de peças presentes no comercio local	2	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
		Uso de materiais comuns	2	9	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
	Mão de obra	Uso de peças comuns a outros equipamentos	3	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
		Fabricação na universidade	5	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	
		Mão de obra disponível	5	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	
Reposição	Uso de oficinas da região	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Manutenção executada por uma pessoa	3	0	0	3	3	3	9	0	0	1	0	1	3	3	0	3	0	0	0	9	0	0	3	3	1	3		
	Peças sobressalentes acessíveis	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	9		
Praticidade	Educativo	Materiais baratos	5	9	9	0	0	0	3	3	3	0	1	3	0	0	0	0	3	3	3	0	3	0	0	0	0	3	
		Permitir visualização dos mecanismos	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
		Tamanho compatível com bancada	3	0	0	9	9	9	3	0	0	3	1	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	
	Locomoção	Plataforma open source (Controlador)	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
		Transportável por uma pessoa	2	0	0	9	9	9	9	0	0	9	0	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1	
		Estável ao transportar	4	0	0	9	9	9	9	3	1	9	0	9	9	9	0	0	9	0	1	0	0	0	0	0	3	0	
		Transporte sem machucar	4	0	0	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	1	1	
		Rápido preparo para transporte	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Manipulador leve	3	3	3	9	9	9	9	1	1	0	0	0	0	0	0	9	9	3	0	0	0	0	3	1	9	3	
Precisão	Rigidez	Tamanho adequado as entradas dos ambientes	3	0	0	9	9	9	1	0	0	0	0	9	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Mantem integridade no transporte	5	0	0	3	0	9	9	3	0	9	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	3	0	
		Baixa vibração da estrutura	5	0	0	3	3	3	9	1	1	9	0	0	0	0	0	9	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Acionamento	Minimização das folgas	5	0	9	3	0	9	9	9	9	3	0	0	0	0	9	9	9	9	0	9	9	0	0	1	0	0	
		Balaceamento da posição dos motores	4	0	0	1	1	1	9	3	0	9	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	
		Encaixe adaptável de E.T. (possível troca)	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Uso de malha fechada (Maior precisão)	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	9	9	9	9	0	0	0	
		Precisão Milimétrica	5	1	9	3	1	9	9	9	3	1	3	0	0	0	9	3	9	9	0	9	0	9	0	1	1	3	0
		Área de trabalho milimetrada	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Segurança	Evitar choques mecânicos (Choque entre eles)	Boa aderência as mãos	2	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
		Ausência de partes cortantes	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
		Evitar descarga elétrica acidental	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	1	0	9	
		Sem fios expostos (Segurança e estética)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	
		Botão de parada	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	
		Estrutura	Resistente a flexão	Resistente a torção	5	9	0	0	0	9	3	0	3	0	0	0	0	0	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Resistente a impactos	4			1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Acesso aos desenhos de montagem (manutenção)	5			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
Manutenção	Uso de poucas ferramentas (manutenção)	Uso de poucas ferramentas (manutenção)	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
		Ferramentas a disposição (próximas ao robô)	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
		Lista de itens a serem checados (na manutenção)	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
Peso Absoluto				316	376	229	185	319	468	227	102	242	40	77	134	134	129	349		293	235	184	93	181	65	134	143	145	387
Peso Relativo (%)				6,09	7,25	4,41	3,57	6,15	9,02	4,38	1,97	4,67	0,77	1,48	2,58	2,58	2,49	6,73		5,65	4,53	3,55	1,79	3,49	1,25	2,58	2,76	2,80	7,46

APÊNDICE B

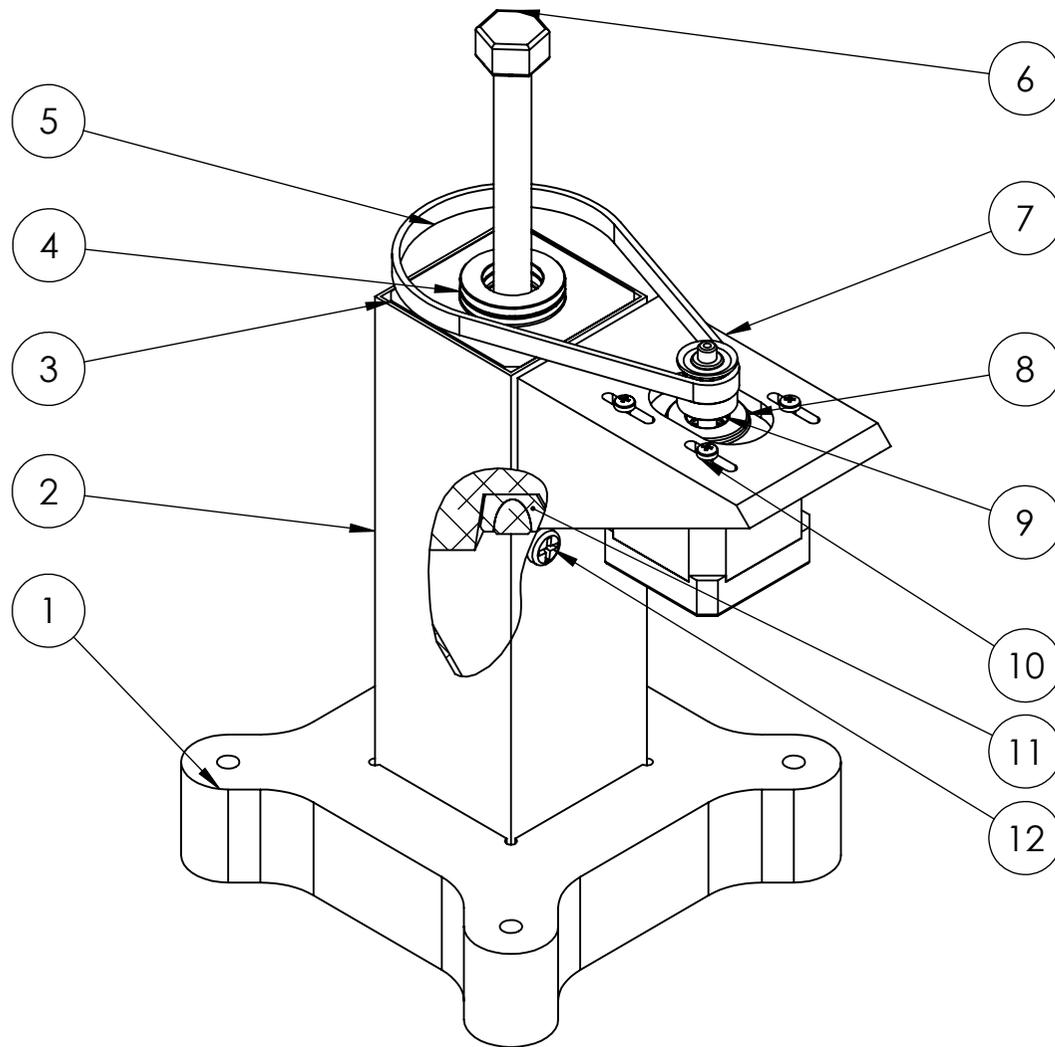


3	Conjunto Segundo Elo	1
2	Conjunto Segundo Elo	1
1	Conjunto Primeiro Elo	1
ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.



PROJETO DE GRADUAÇÃO
Manipulador SCARA

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material:
 	Escala: 1:5	Unidade: mm	Folha: 1/13

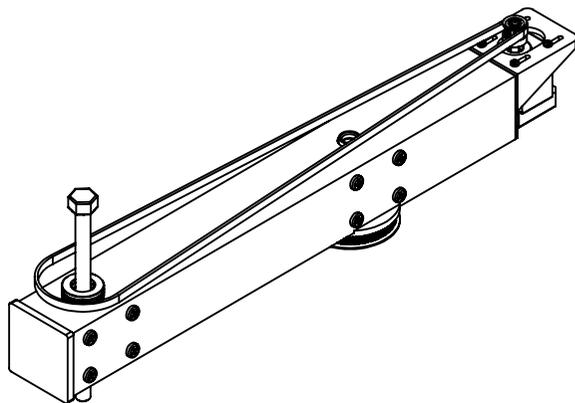
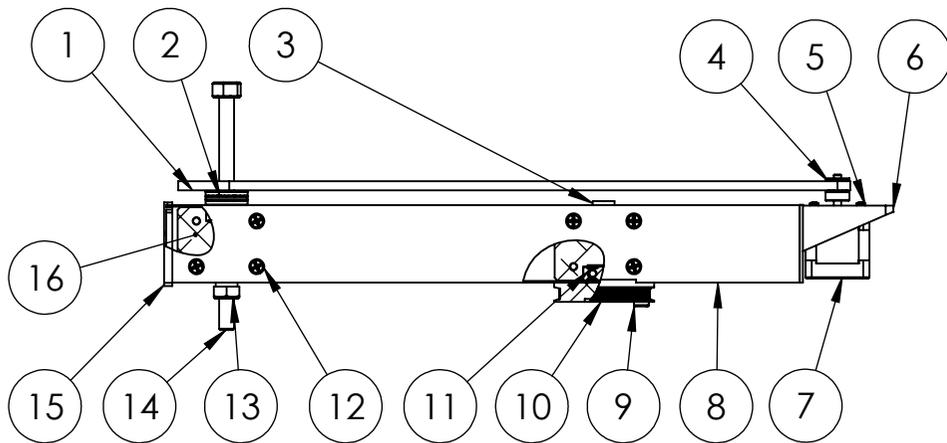


12	Parafuso rosca soberba 4x20mm		9
11	Porca M10	Porca sextavada M10	1
10	Parafuso M3 x 10mm		4
9	Polia GT2 16 dentes		1
8	Motor Nema 17		1
7	Suporte motor primeira junta	Polimero ABS	1
6	Parafuso M10	M10 - 150mm rosca parcial	1
5	Correia primeira junta	GT2 - 280mm - 6mm	1
4	51102	Rolamento axial	1
3	Bloco de engaste primeira junta	Polimero ABS	1
2	Primeiro elo	Perfil aluminio 51x51x1mm	1
1	Engaste primeiro elo	MDF 30mm	1
ITEM	PEÇA	Descrição	QTD.



PROJETO DE GRADUAÇÃO
Conjunto Primeiro Elo

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material:
	Escala: 1:2	Unidade: mm	Folha: 2/13

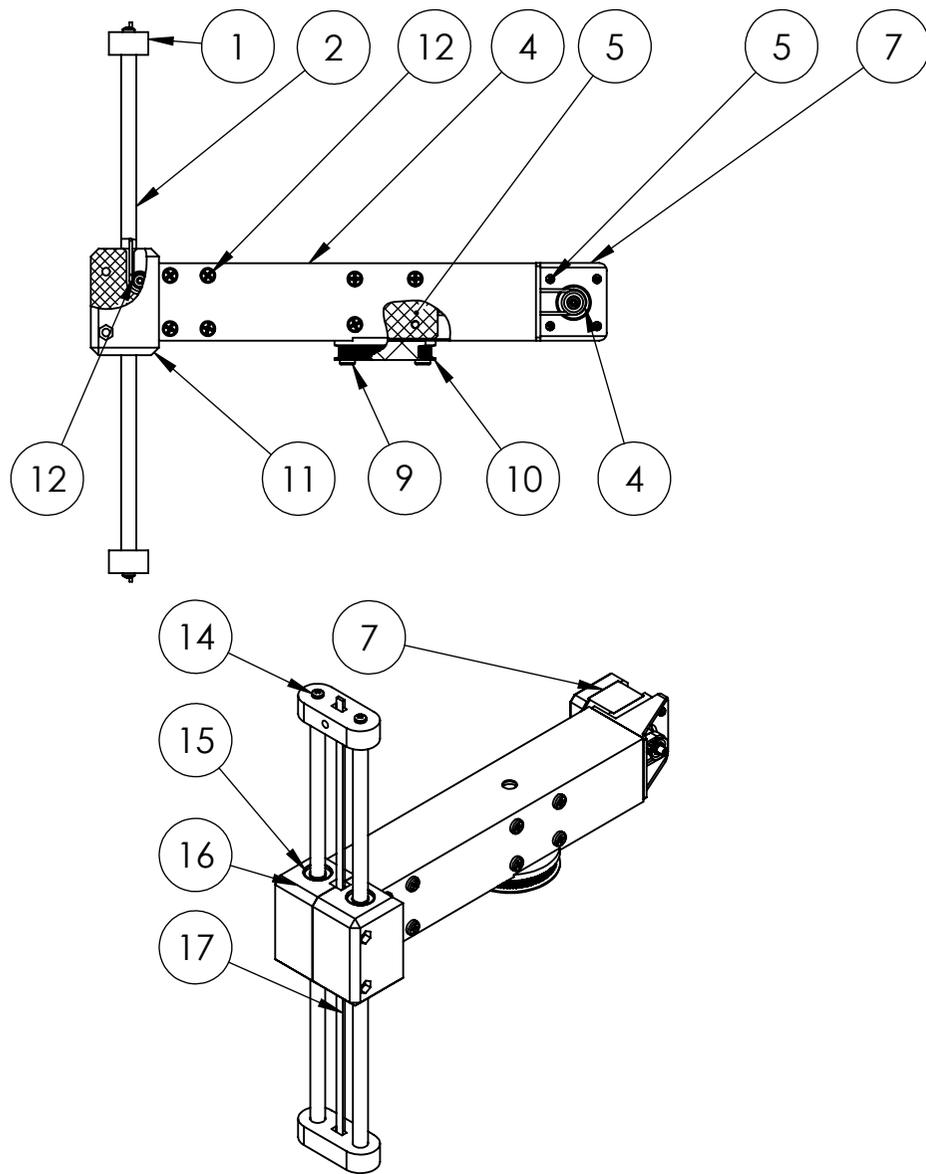


16	Bloco de deslizamento	Polimero ABS	2
15	Tampa de extremidade	Polimero ABS	1
14	Parafuso M10	M10 - 150mm	1
13	Porca M10	Porca sextavada M10	1
12	Parafuso rosca soberba 4x20mm		16
11	6200-2Z	Rolamento radial de esferas	4
10	Polia dentada correia GT2	Polimero ABS	1
9	Parafuso rosca soberba 4x50mm		2
8	Segundo Elo	Perfil Aluminio 51x51x1mm	1
7	Motor Nema 17		1
6	Suporte motor segunda junta	Polimero ABS	1
5	Parafuso M3 x 10mm		4
4	Polia GT2 16 dentes	Alumínio	1
3	Espacador	Ø12 - 5mm	2
2	51102	Rolamento axial	1
1	Correia interrompida segunda junta	Comprimento 1m	1
ITEM	Nº DA PEÇA	Descrição	QTD.



PROJETO DE GRADUAÇÃO
Conjunto Segundo Elo

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material:
	Escala: 1:5	Unidade: mm	Folha: 3/13

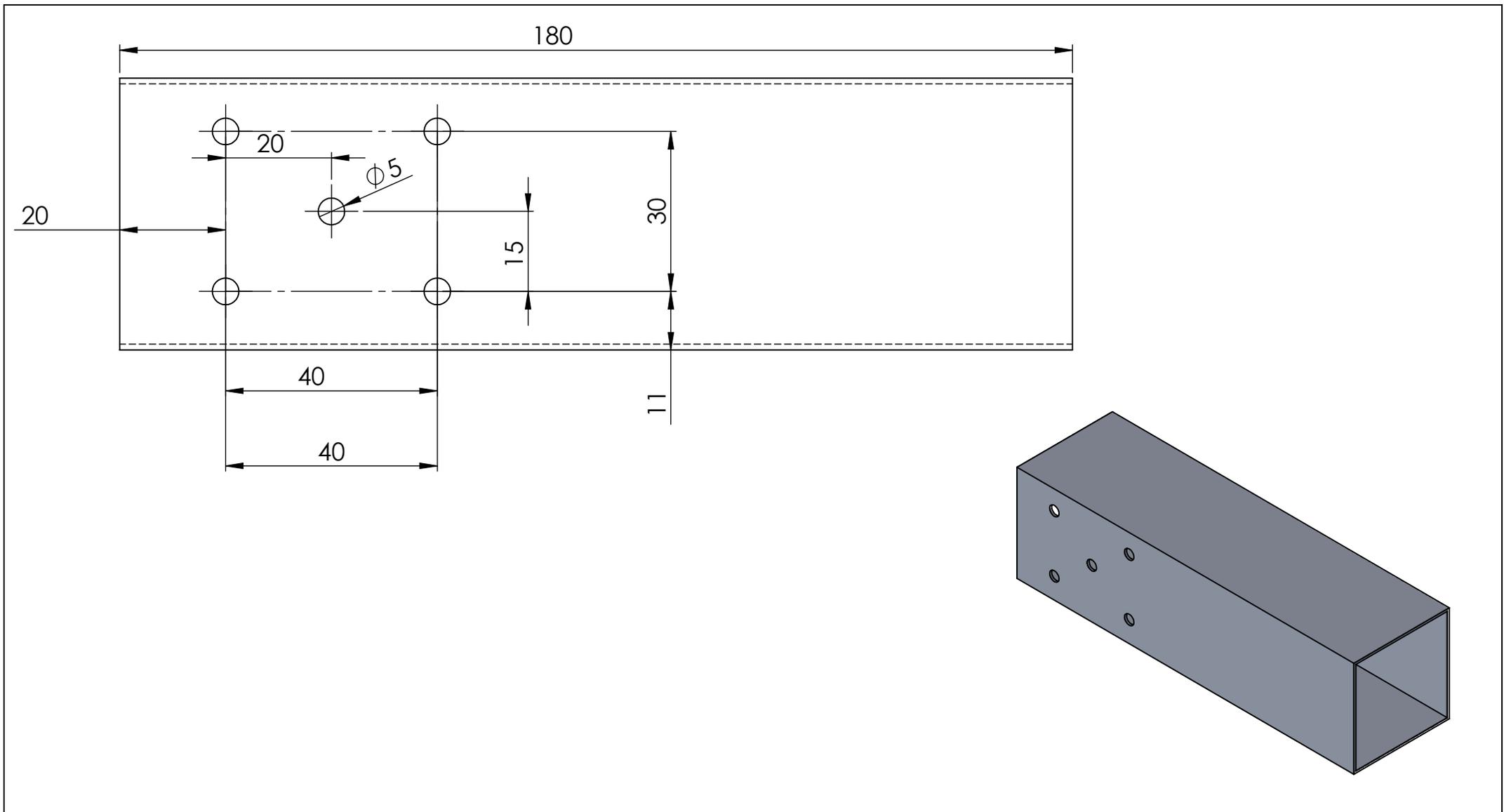


17	Correia interrompida terceira junta	Comprimento 1m	1
16	Bloco guia esquerdo - eixo Z	Polimero ABS	1
15	LM10UU	Rolameto linear	4
14	Parafuso M4 x 20mm		4
13	Motor Nema 17		1
12	F623ZZ	Rolamento radial com flange	4
11	Bloco guia direito - eixo Z	Polimero ABS	1
10	Parafuso rosca soberba 4x50mm		2
9	Polia dentada correia GT2	Polimero ABS	1
8	Polia GT2 16 dentes	Aluminio	1
7	Suporte motor terceira junta	Polimero ABS	1
6	Parafuso M3 x 10mm		4
5	Bloco de engaste segunda junta	Polimero ABS	1
4	Terceiro Elo	Perfil Aluminio 51x51x1mm	1
3	Parafuso rosca soberba 4x20mm		16
2	Barra Aluminio 10mm	Aluminio anodizado	2
1	Tensionador terceira junta	Polimero ABS	2
ITEM	Nº DA PEÇA	Descrição	QTD.

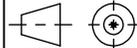


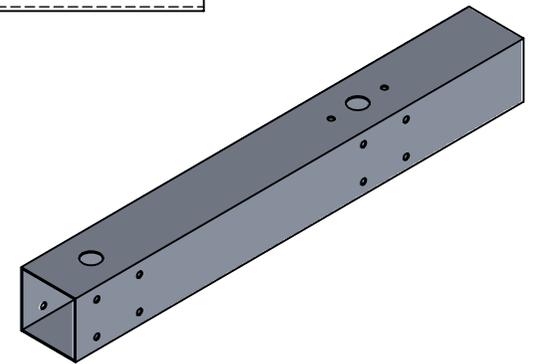
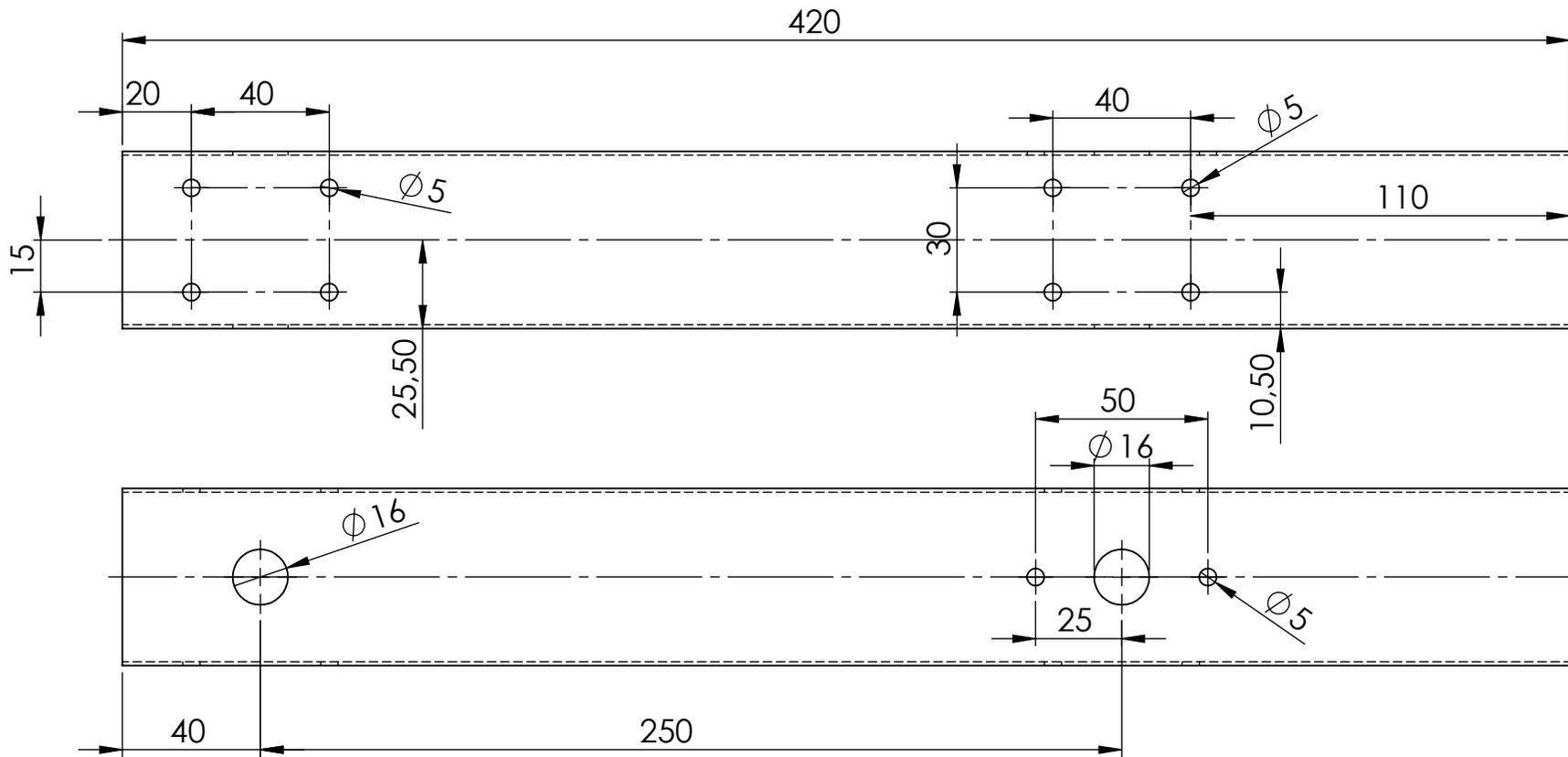
PROJETO DE GRADUAÇÃO
Conjunto Terceiro Elo

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material:
	Escala: 1:5	Unidade: mm	Folha: 4/13



Nota 1: Perfil quadado 51 mm, 1 mm de espessura
 Nota 2: furos passantes nas duas faces paralelas do tubo

 PROJETO DE GRADUAÇÃO Primeiro Elo			
Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: Alumínio
	Escala: 1:1	Unidade: mm	Folha: 5/13

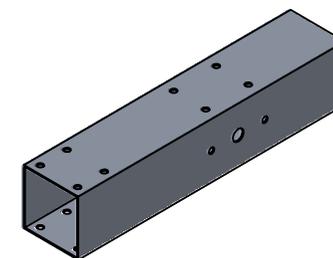
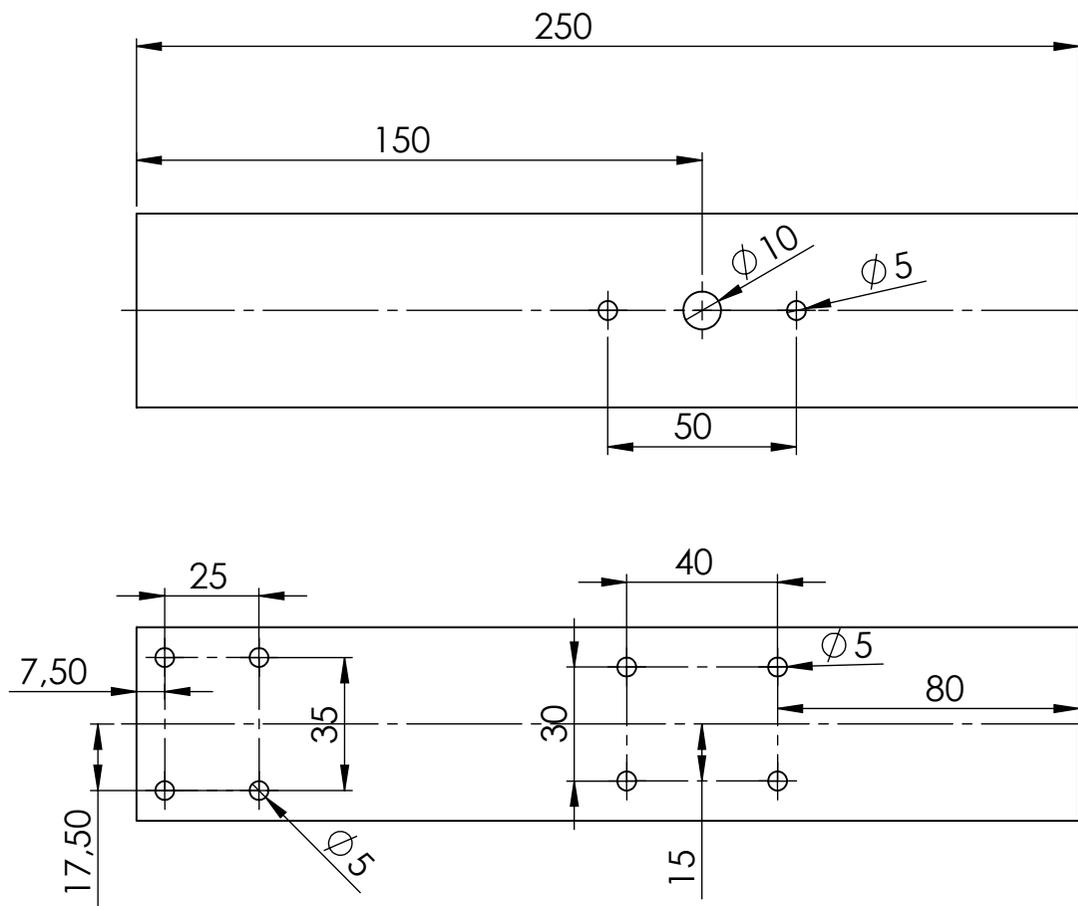


Nota 1: Perfil quadradado 51mm, 1mm de espessura
 Nota 2: furos passantes nas duas faces paralelas do tubo



PROJETO DE GRADUAÇÃO
 Segundo Elo

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: Aluminio
Escala: 1:2		Unidade: mm	Folha: 6/13

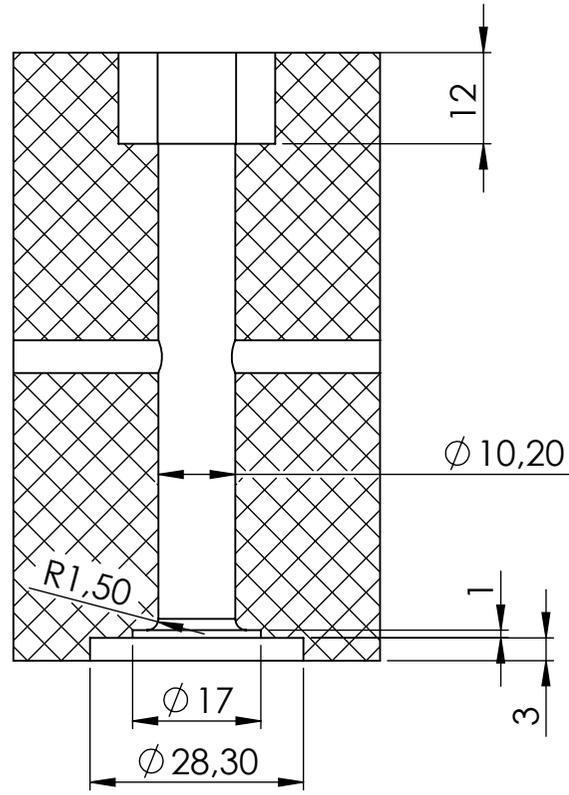
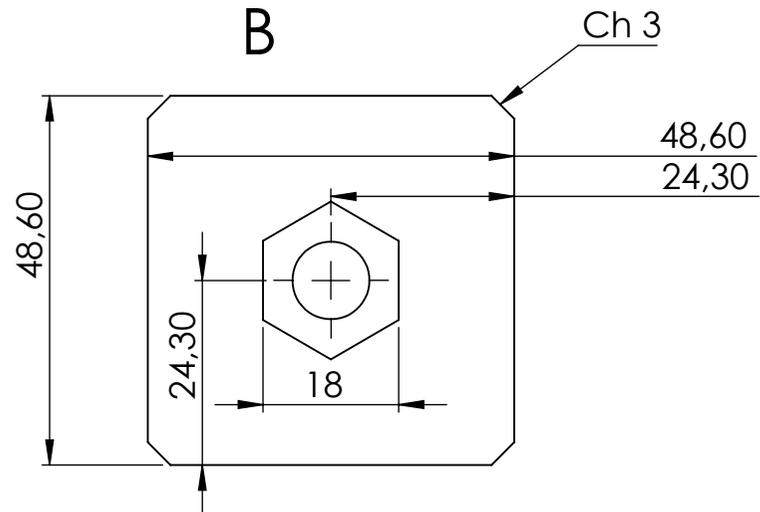
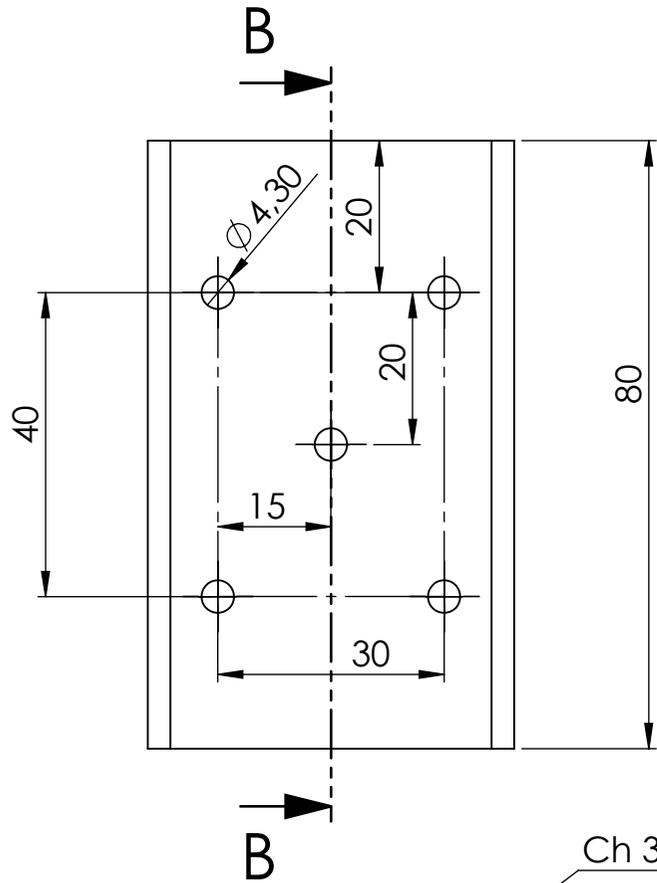


Nota 1: Perfil quadado 51mm, 1mm de espessura
 Nota 2: furos passantes nas duas faces paralelas do tubo

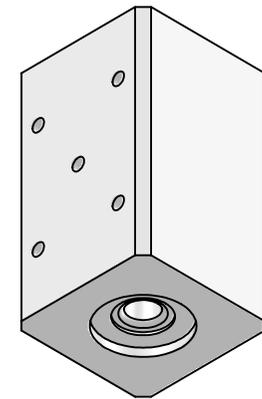


PROJETO DE GRADUAÇÃO
 Terceiro Elo

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: Aluminio
Escala: 1:2		Unidade: mm	Folha: 7/13

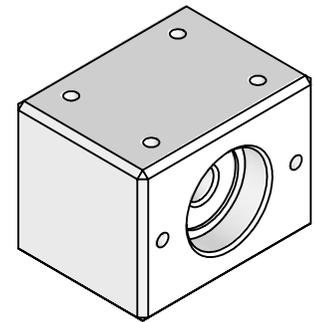
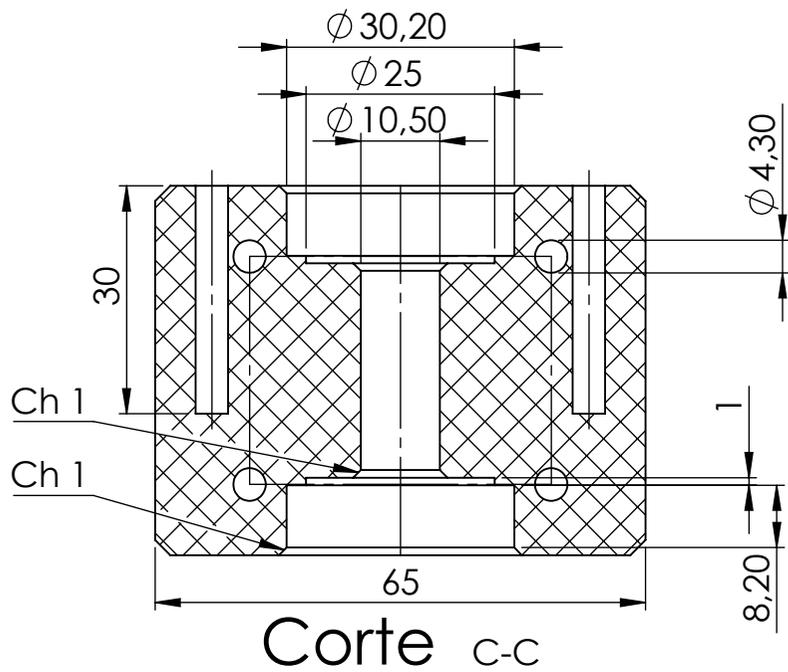
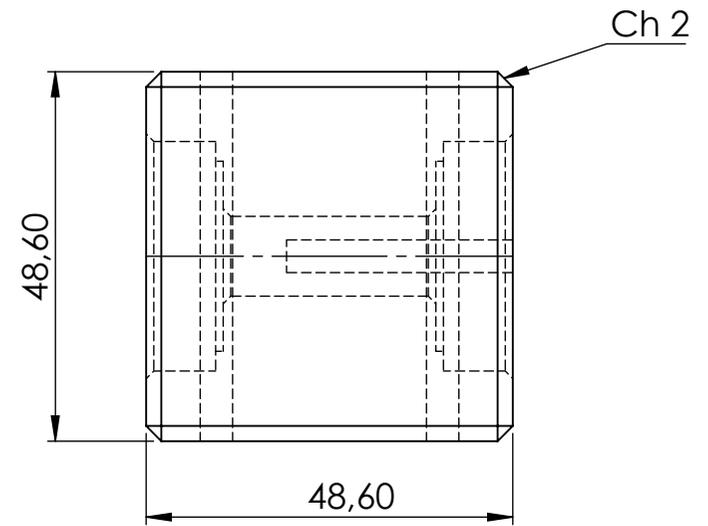
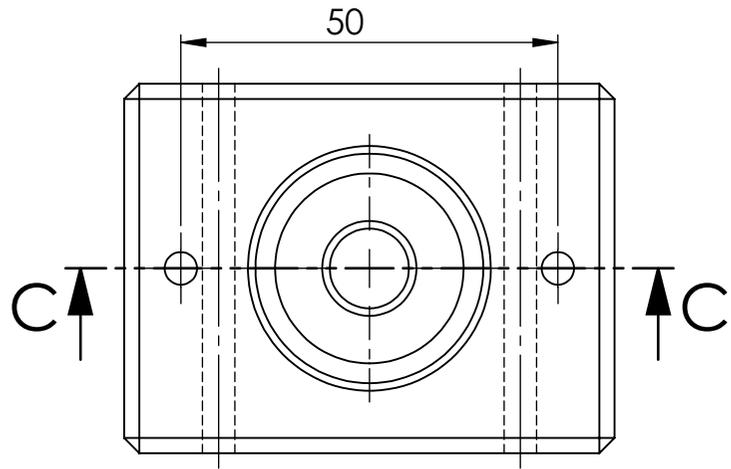


Corte B-B

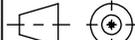


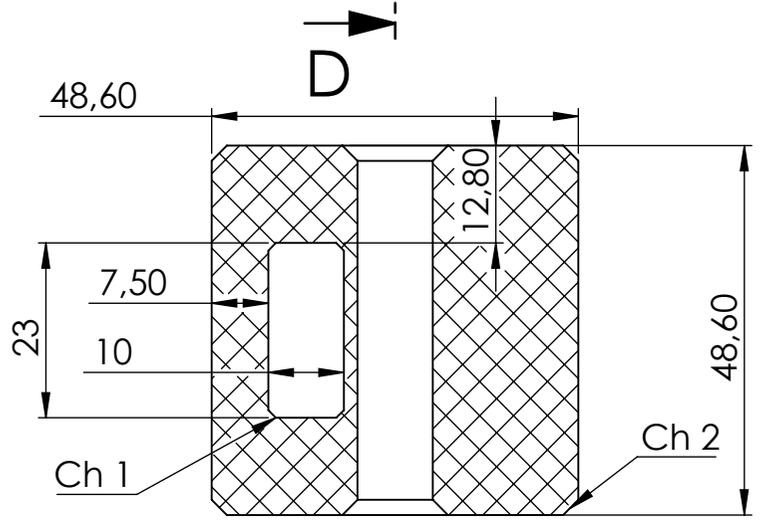
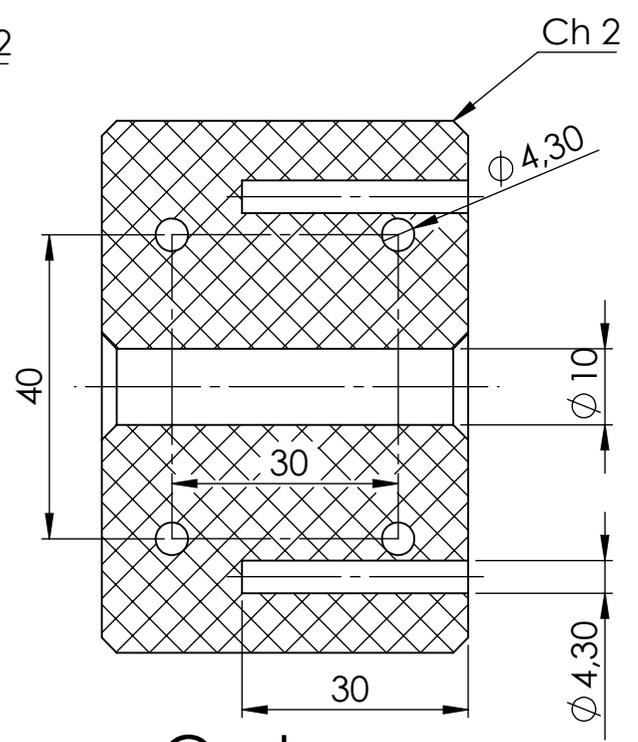
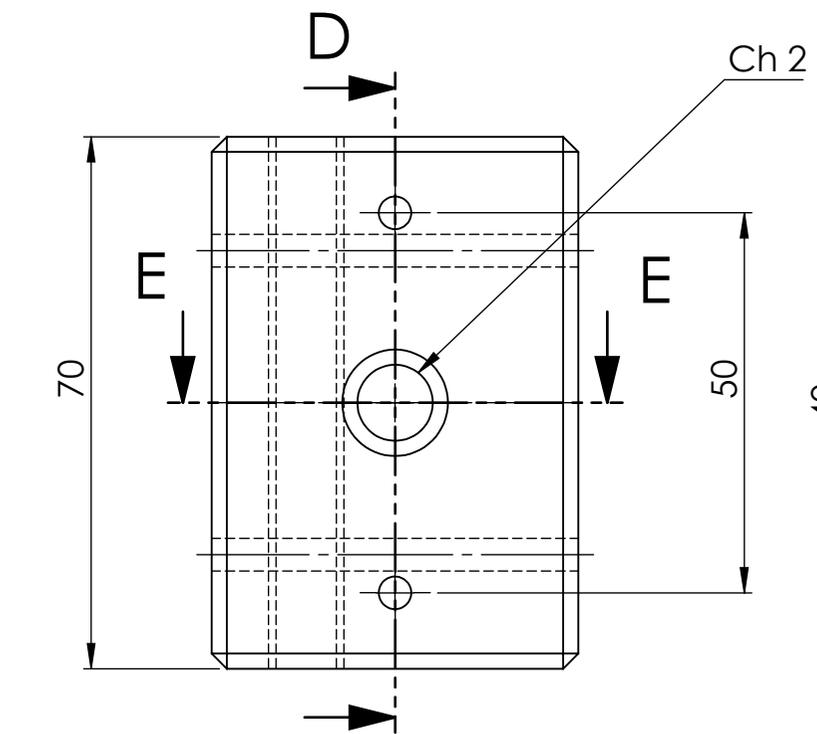
PROJETO DE GRADUAÇÃO
Bloco de engaste primeira junta

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
Escala: 1:1		Unidade: mm	Folha: 8/13



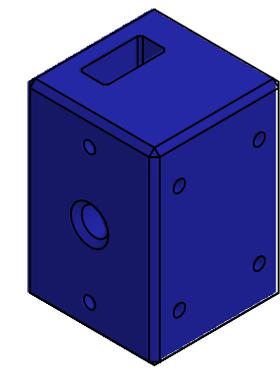
PROJETO DE GRADUAÇÃO
Bloco de deslizamento

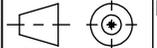
Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
	Escala: 1:1	Unidade: mm	Folha: 9/13

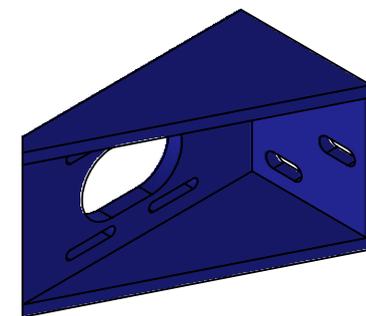
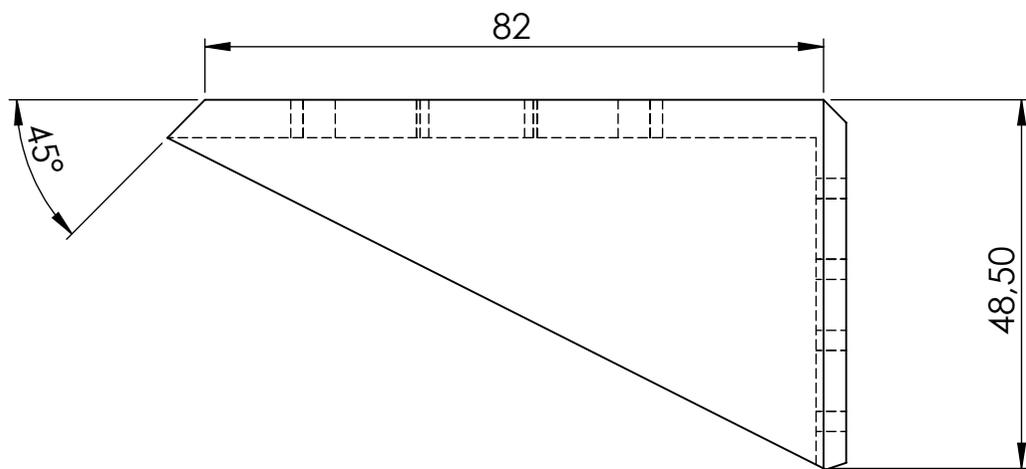
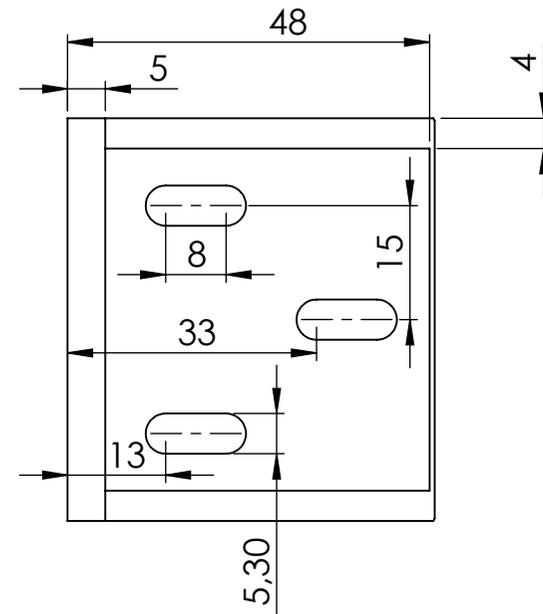
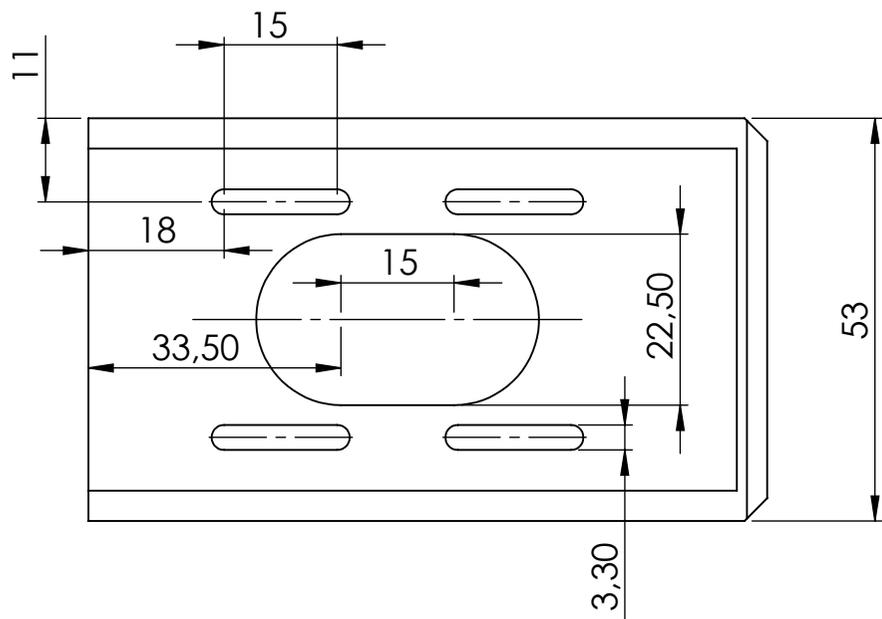


Corte D-D

Corte E-E

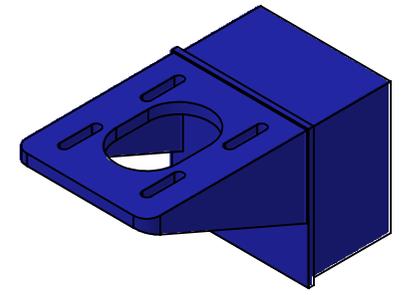
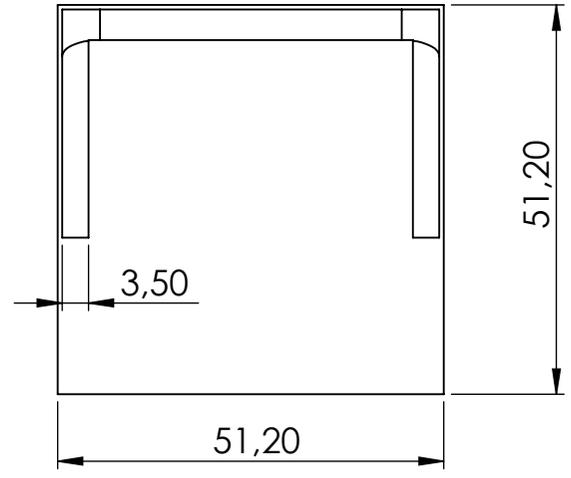
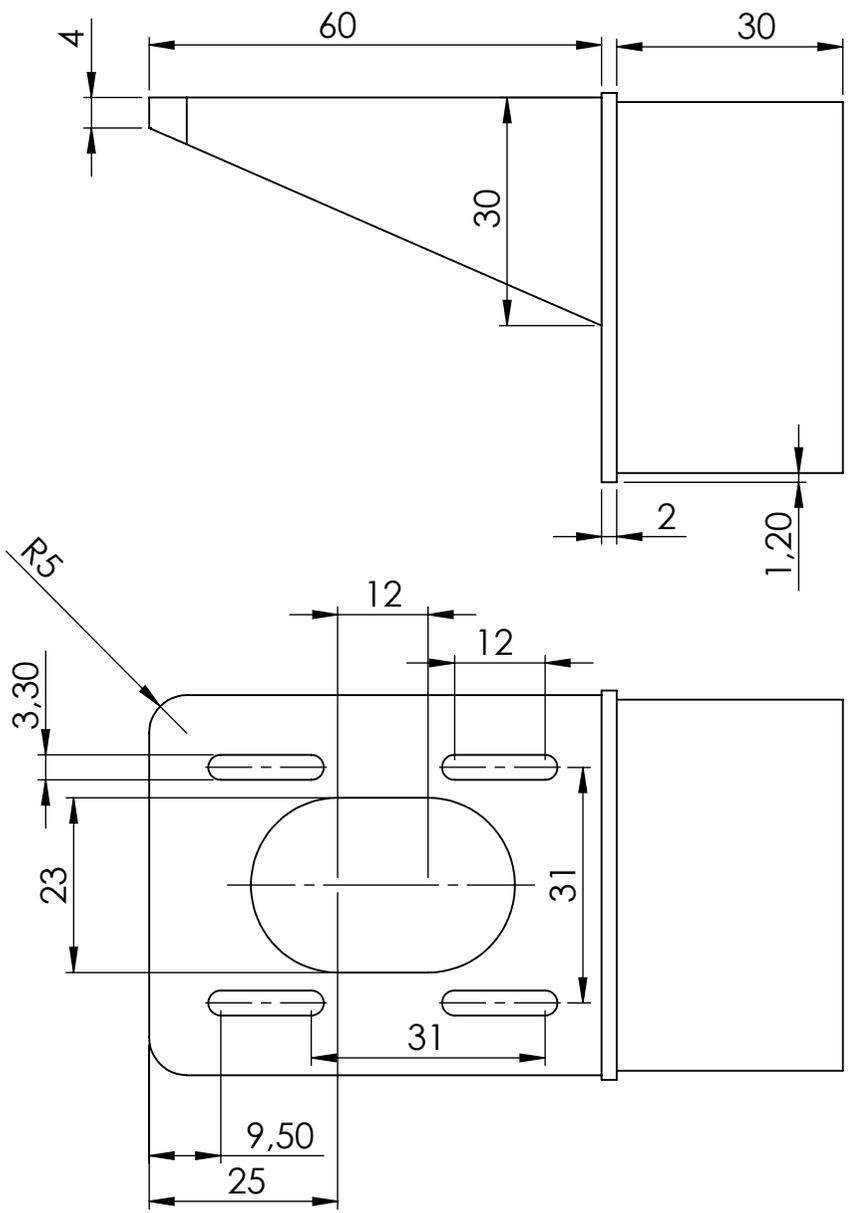


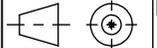
 PROJETO DE GRADUAÇÃO Bloco de engaste da segunda junta			
Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
 Escala: 1:1		Unidade: mm	Folha: 10/13

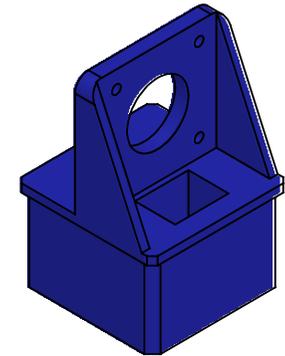
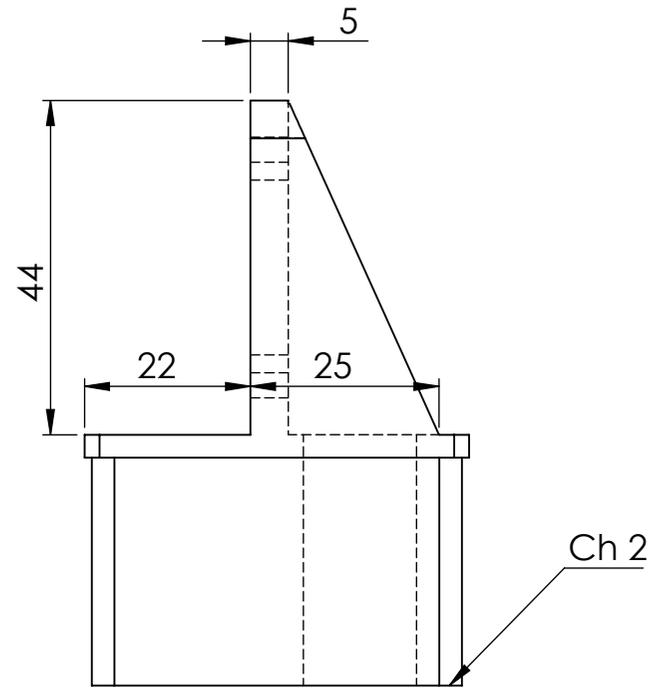
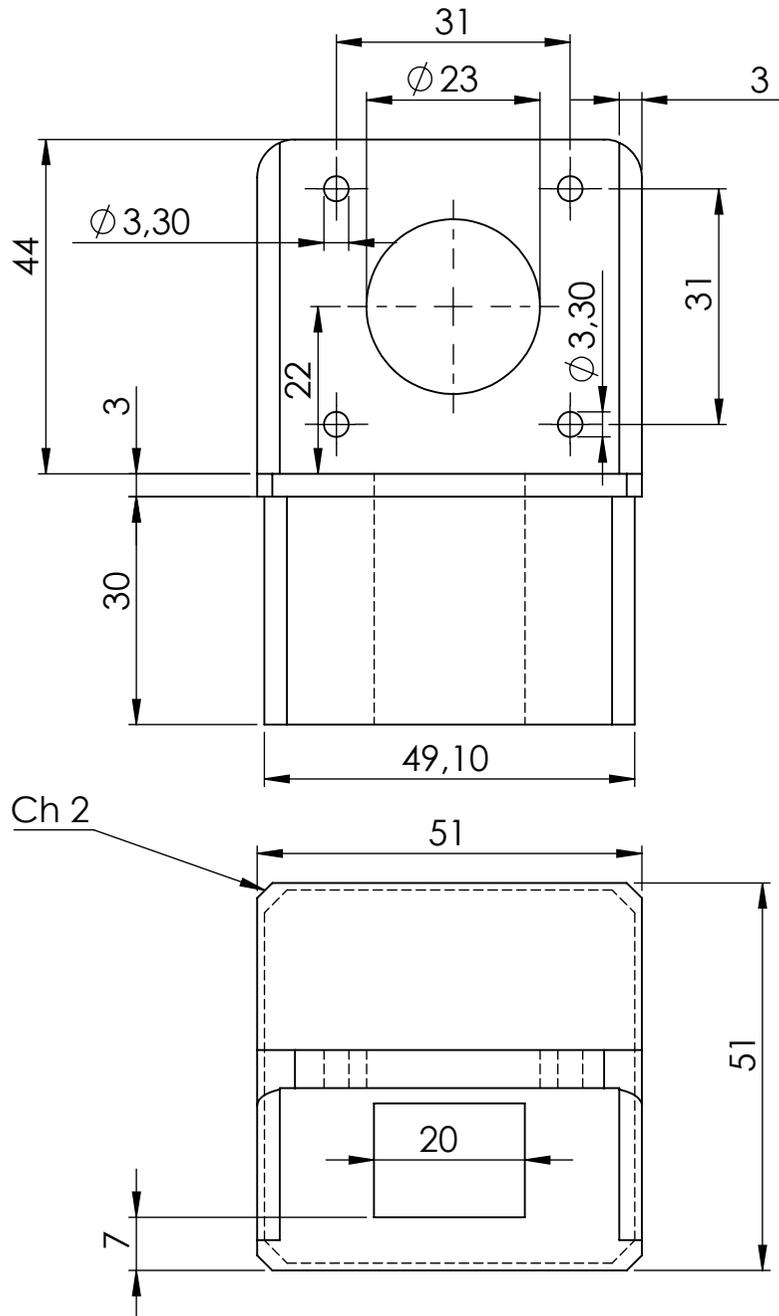


PROJETO DE GRADUAÇÃO
Suporte motor primeira junta

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
 	Escala: 1:1	Unidade: mm	Folha: 11/13



 PROJETO DE GRADUAÇÃO Suporte motor segunda junta			
Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
	Escala: 1:1	Unidade: mm	Folha: 12/13



PROJETO DE GRADUAÇÃO
Suporte motor terceira junta

Data: 04/07/2019	Projeto: André Amorim	Desenho: André Amorim	Material: ABS
Escala: 	1:1	Unidade: mm	Folha: 13/13