



PROJETO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PARA APLICAÇÕES ASSISTIVAS

Por,
Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto

Brasília, 27 de Junho de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR
ROBÓTICO PARA APLICAÇÕES ASSISTIVAS**

POR,

Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto

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

Banca Examinadora

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

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, UnB/ ENM

Prof. José Maurício Santos Torres Mota, UnB/ ENM

Brasília, 27 de Junho de 2019

Agradecimentos

Confiança nenhuma eu teria para encarar esse trabalho e os próximos grandes desafios, que almejo viver na minha vida, sem o apoio incondicional, amor interminável e valores sólidos que recebi desde pequeno dos meus pais, Pedro José e Ana Luiza, e também do meu irmão, Pedrinho.

Tenho o privilégio de contar com avós espetaculares, Luiz Francisco e Ecléa, que ao longo de toda a minha trajetória sempre se fizeram presentes e me incentivaram.

Não posso deixar de agradecer a todos os meus amigos e amigas, que dividiram e dividem essa jornada comigo, tornando-a mais leve e divertida. Agradeço também, em especial, à Ana Luísa por conseguir despertar o que há de melhor em mim todos os dias nessa belíssima história que estamos vivendo juntos.

Professor Britto, obrigado por todos os questionamentos que o senhor me fez e faz, sem eles provavelmente este trabalho não seria metade do que ele é.

Aos técnicos e amigos Pereira, Artur e Alexandre que em muito auxiliaram na construção do robô.

Por fim, agradeço a TECMEC – Empresa Júnior de Engenharia Mecânica e a Concentro – Federação das Empresas Juniores do Distrito Federal por despertarem em mim o ímpeto de trabalhar duro, entregando resultado e com um porquê claro. Afinal, todo esforço é reconhecido, mas só a vitória é recompensada.

Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do arcabouço teórico relativo a análise cinemática e dinâmica de manipuladores, aspectos construtivos das cadeiras de rodas, seleção e dimensionamento de elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos; análise de WMRA (*Wheelchair mounted robotic arms*) já existentes no mercado e nos ambientes universitários, a metodologia, o projeto e, ainda, o protótipo em si de um braço manipulador montado em cadeira de rodas com o objetivo de auxiliar pessoas com deficiência motora dos membros superiores e inferiores a terem uma maior qualidade de vida.

Palavras-chave: WMRA, Cadeira de rodas, Tecnologia Assistiva, Lesão medular, Manipulador robótico.

ABSTRACT

This study presents the development of the theoretical framework related to kinematic and dynamic analysis of manipulators, wheelchair constructive aspects, selection and dimensioning of mechanical, electrical and electronic elements; the analysis of WMRA (Wheelchair mounted robotic arms) already existing in the market and university environments, the methodology, the design, and also the prototype itself of a manipulator arm mounted in a wheelchair with the objective of helping people with motor disabilities of the upper and lower limbs to have a higher quality of life.

Keywords: WMRA, Wheelchair, Assistive Technology, Spinal Cord Injury, Robotic manipulator.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 3 |
| 1.3 | METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 3 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 | LESÃO MEDULAR | 6 |
| 2.2 | DEFINIÇÃO DE ROBÔS MANIPULADORES | 8 |
| 2.3 | ESTRUTURA GERAL BÁSICA DE UM ROBÔ | 8 |
| 2.4 | BRAÇOS ROBÓTICOS MONTADOS SOBRE CADEIRAS DE RODAS | 10 |
| 2.5 | CADEIRA DE RODAS | 18 |
| 2.6 | CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES | 23 |
| 2.7 | VELOCIDADES DO EFETUADOR TERMINAL | 25 |
| 2.8 | MOVIMENTO DOS ELOS DE UM MANIPULADOR | 26 |
| 2.8.1 | “PROPAGAÇÃO” DE VELOCIDADE ENTRE ELOS | 26 |
| 2.8.2 | ACELERAÇÃO LINEAR DE CORPOS RÍGIDOS | 28 |
| 2.8.3 | ACELERAÇÃO ANGULAR DE CORPOS RÍGIDOS | 28 |
| 2.8.4 | DISTRIBUIÇÃO DE MASSA | 29 |
| 2.9 | DINÂMICA DOS MANIPULADORES | 29 |
| 2.9.1 | EQUAÇÃO DE NEWTON E EULER | 29 |
| 2.9.2 | FORÇA E TORQUE AGINDO SOBRE AS JUNTAS | 30 |
| 2.10 | DEFLEXÕES EM VIGAS | 32 |
| 3 | PROJETO CONCEITUAL | 34 |
| 3.1 | ESPECIFICAÇÕES DE TAREFAS | 34 |
| 3.2 | SÍNTESE E CONCEPÇÃO | 36 |
| 3.3 | ANÁLISE | 38 |
| 3.4 | SELEÇÃO | 49 |
| 3.5 | FATOR DE SEGURANÇA GLOBAL DO SISTEMA | 56 |
| 3.6 | RESUMO DO CONCEITO DO PROJETO | 59 |
| 4 | PROJETO MECÂNICO | 61 |
| 4.1 | PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO ROBÔ | 61 |
| 4.2 | ANÁLISE CINEMÁTICA | 62 |
| 4.3 | ROBOTICS TOOLBOX | 64 |
| 4.4 | ANÁLISE DINÂMICA | 67 |
| 4.5 | SELEÇÃO DOS ATUADORES | 74 |
| 4.6 | PROJETO DE ENGRENAGENS | 76 |
| 4.7 | PROJETO DE EIXOS | 82 |
| 4.8 | DIMENSIONAMENTO DAS CHAVETAS | 94 |
| 4.9 | SELEÇÃO DE ROLAMENTOS | 95 |
| 4.10 | PROJETO CONTRA DEFLEXÃO DO MANIPULADOR | 96 |
| 4.11 | DESIGN E MODELAGEM DO ROBÔ | 98 |
| 4.12 | ANÁLISE ESTRUTURAL DA BASE | 102 |
| 5 | PROTOTIPAGEM | 106 |
| 5.1 | MOCKUP | 106 |
| 5.2 | PROTÓTIPO | 107 |
| 5.3 | CUSTO | 115 |
| 6 | CONCLUSÃO | 117 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 118 |
| | APÊNDICE | 122 |
| | ANEXOS | 163 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxo da Organização e Metodologia do Projeto..... | 5 |
| Figura 2 - Coluna Vertebral. Adaptado de (Instituto Novo Ser, 2018)..... | 6 |
| Figura 3 - Dermátomo humano. Adaptado de (Instituto Novo Ser, 2018)..... | 7 |
| Figura 4 - Sequência de elos numa junta de um braço robótico. Adaptado de (Carrara, 2015).. | 9 |
| Figura 5 - Anatomia de um braço robótico real (Carrara, 2015)..... | 9 |
| Figura 6 - Usuário do JACO (Kinova Technology, 2018)..... | 11 |
| Figura 7 - Braço Robótico JACO (Kinova Technology, 2018). | 11 |
| Figura 8 – Usuário do iARM (Exact Dynamics, 2018)..... | 12 |
| Figura 9 – Estrutura das juntas rotativas do braço do Weston Wheelchair (Hillman, Hagan, Hagan, Jepson, & Orpwood, 2002). | 12 |
| Figura 10 – Usuário do Weston Wheelchair (Hillman, Hagan, Hagan, Jepson, & Orpwood, 2002)..... | 13 |
| Figura 11 - Raptor Arm (D. Edwards, 2005). | 13 |
| Figura 12 - Esquema do design do DORA. Adaptado de (Rapacki, 2009)..... | 14 |
| Figura 13 – DORA. | 14 |
| Figura 14 – Usuário do KARES (Song, Lee, Kim, Yoon, & Bien, 1998). | 15 |
| Figura 15 - Aspecto Cinemático do Mats. Adaptado de (Balaguer, et al., 2006). | 15 |
| Figura 16 - Simetria do Robô Mats (Balaguer, et al., 2006). | 16 |
| Figura 17 - Robô da USF na posição de alimentação (D. Edwards, 2005)..... | 16 |
| Figura 18 - Usuário do RAPUDA (Deyle, 2010)..... | 17 |
| Figura 19 - Mecanismo Telescópico do RAPUDA (Deyle, 2010). | 17 |
| Figura 20 - Partes de uma Cadeira de Rodas típica (Organização Mundial da Saúde, 2012).. | 18 |
| Figura 21 - Cadeira de rodas manual, motorizada e esportiva (ABNT, 2015). | 19 |
| Figura 22 - Dimensões do módulo de referência (ABNT, 2015)..... | 19 |
| Figura 23 - Largura para deslocamento em linha reta (ABNT, 2015). | 19 |
| Figura 24 - Área para manobra de cadeira de rodas sem deslocamento (ABNT, 2015)..... | 20 |
| Figura 25 - Área para manobra de cadeira de rodas com deslocamento (ABNT, 2015). | 20 |
| Figura 26 - Alcance manual frontal com superfície de trabalho de um pessoa em cadeira de rodas (ABNT, 2015)..... | 21 |
| Figura 27 - Alcance manual lateral sem deslocamento de tronco (ABNT, 2015). | 22 |
| Figura 28 - Alcance manual lateral e frontal com deslocamento de tronco (ABNT, 2015). ... | 22 |
| Figura 29 - Método D-H (Cabral, 2017). | 23 |
| Figura 30 - Vetores velocidades de elos vizinhos (Craig, 2012). | 27 |
| Figura 31 - Diagrama de corpo livre de um elo genérico para o equilíbrio de forças e momentos (Craig, 2012)..... | 31 |
| Figura 32 - Viga em balanço usada como modelo de rigidez de um elo em relação a uma carga final (Craig, 2012). | 33 |
| Figura 33 - Matriz Morfológica para o Manipulador Robótico. | 37 |
| Figura 34 - Movimentos de Roll, Pitch e Yaw em um punho esférico (Carrara, 2015). | 41 |
| Figura 35 - Manipulador articulado com punho com eixos que não se cruzam (Craig, 2012).41 | |
| Figura 36 - Custo de braços robóticos em função da capacidade de carga para atuadores hidráulico e elétrico (Carrara, 2015). | 44 |
| Figura 37 - Funções mais atrativas da Matriz Morfológica após análise..... | 48 |
| Figura 38 - Esquema de montagem traseira. | 50 |
| Figura 39 - Esquema de montagem lateral..... | 50 |
| Figura 40 - Esquema de montagem frontal.. | 50 |
| Figura 41 - Cadeira de rodas base disponível no laboratório do GRACO..... | 52 |
| Figura 42 - Principais posições que o manipulador deverá ser capaz de alcançar..... | 53 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 43 – Comprimentos totais que o manipulador deve assumir. | 54 |
| Figura 44 - Conceito final do projeto. | 60 |
| Figura 45 – Dimensões dos elos. | 61 |
| Figura 46 – Modelagem D-H do manipulador. | 62 |
| <i>Figura 47 - Representação do Robô pela RTB na configuração qz.</i> | <i>65</i> |
| Figura 48 - Representação do Robô pela RTB na configuração <i>qr</i> | 65 |
| Figura 49 - Representação do Robô pela RTB na configuração <i>qg</i> | 65 |
| Figura 50 - Interface de controle junta a junta na RTB. | 66 |
| Figura 51 - Braços de Alavanca para diferentes posição dos elos. | 67 |
| Figura 52 - Esquema da primeira abordagem. | 67 |
| Figura 53 - Diagramas de corpo livre para as equações de (4-9) a (4-11). | 68 |
| Figura 54 - Motor de Passo HT23-397/NEMA 23 (KALATEC Automação, 2019). | 74 |
| Figura 55 - Motor Mabuchi JC/LC-578VA (Mabuchi Motor, 2019). | 75 |
| Figura 56 - Motor de passo 42HS48-1684/NEMA 17 (KALATEC Automação, 2019). | 75 |
| Figura 57 - Diagrama de Corpo Livre eixo a. | 82 |
| Figura 58 - Diagrama de Corpo Livre eixo b. | 83 |
| Figura 59 - Diagrama de Corpo Livre eixo c. | 83 |
| Figura 60 - Diagrama de Corpo Livre eixo e. | 83 |
| Figura 61 – Diagrama de esforço axial do eixo a. | 85 |
| Figura 62 – Diagrama de esforço cortante do eixo a. | 85 |
| Figura 63 – Diagramas de momento fletor do eixo a. | 86 |
| Figura 64 – Diagrama de esforço cortante do eixo b. | 86 |
| Figura 65 – Diagrama de momento fletor do eixo b. | 87 |
| Figura 66 – Diagrama de esforço cortante do eixo c. | 87 |
| Figura 67 – Diagrama de momento fletor do eixo c. | 88 |
| Figura 68 – Diagrama de esforço axial do eixo e. | 88 |
| Figura 69 – Diagrama de esforço cortante do eixo e. | 89 |
| Figura 70 – Diagrama de momento fletor do eixo e. | 89 |
| Figura 71 - Viga biapoiada com carga concentrada em uma seção qualquer (Juvinall, 2013). | 92 |
| Figura 72 - Viga biapoiada com carga concentrada na extremidade externa (Juvinall, 2013). | 92 |
| Figura 73 - Viga biapoiada com momento aplicado na extremidade externa (Juvinall, 2013). | 92 |
| | 92 |
| Figura 74 - Dimensões chaveta paralela (ABNT, 1992). | 94 |
| Figura 75 - Viga engastada com carga concentrada na extremidade e com carga concentrada em uma seção qualquer (Juvinall, 2013). | 97 |
| Figura 76 - Variação da deflexão com o aumento do payload. | 97 |
| Figura 77 - Modelagem em 3D de todos os componentes do robô, a exceção dos parafusos, porcas e arruelas. | 98 |
| Figura 78 - Modelagem do robô montado. | 99 |
| Figura 79 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração <i>qz</i> | 99 |
| Figura 80 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração <i>qr</i> | 100 |
| Figura 81 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração <i>qg</i> | 100 |
| Figura 82 - Modelagem do robô montado na cadeira de rodas. | 100 |
| Figura 83 - Malha de um componente para o MEF (SOLIDWORKS, 2019). | 102 |
| Figura 84 - Condições de contorno: fixação e conectores. | 103 |
| Figura 85 - Condições de contorno: cargas externas. | 103 |
| Figura 86 - Malha gerada para a base. | 104 |
| Figura 87 - Resultado da simulação: deslocamento em mm com uma escala de distorção de 20. | 104 |
| Figura 88 - Resultado da simulação: deslocamento em mm com a escala real de distorção. | 105 |
| Figura 89 - Mockup montado. | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 90 - Mockup montado na cadeira de rodas. | 106 |
| Figura 91 - Torno do GRACO. | 107 |
| Figura 92 - Furadeira de coluna do GRACO. | 108 |
| Figura 93 - Máquina de corte do GRACO. | 108 |
| Figura 94 - Máquina de corte de chapas do SG09. | 108 |
| Figura 95 - Furadeira de coluna do SG09. | 109 |
| Figura 96 - Dobradeira no SG09. | 109 |
| Figura 97 - Impressora 3D com filamento PLA. | 109 |
| Figura 98 - Montagem da base parcial. | 110 |
| Figura 99 - Montagem da base. | 110 |
| Figura 100 - Montagem parcial do elo 1. | 111 |
| Figura 101 - Montagem final do elo 1. | 111 |
| Figura 102 - Montagem parcial dos elos 3 e 4. | 112 |
| Figura 103 - Montagem final dos elos 3 e 4. | 112 |
| Figura 104 - Montagem do robô no GRACO (1). | 113 |
| Figura 105 – Montagem do robô no GRACO (2). | 114 |
| Figura 106 – Montagem do robô no GRACO (3). | 114 |
| Figura 107 - Cadeira de Rodas Ortobras ULX (Ortobras, 2018). | 165 |
| Figura 108 - Catálogo PTI dos rolamentos selecionados. | 170 |
| Figura 109- Catálogo ASAHI dos rolamentos selecionados. | 171 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Aspectos construtivos das WMRA's existentes. | 35 |
| Tabela 2 – Propriedades médias (MATWEB, 2018). | 38 |
| Tabela 3 – Matriz de Decisão: Material | 39 |
| Tabela 4 – Matriz de Decisão: Configuração | 40 |
| Tabela 5 - Comprimentos totais que o manipulador deve assumir para cada caso da Fig. (44). | 54 |
| Tabela 6 - Fatores de penalização para o cálculo do FS global. | 57 |
| Tabela 7 – Metas de projeto para o conceito desenvolvido. | 59 |
| Tabela 8 - Dimensões dos elos. | 61 |
| Tabela 9 – Limites Angulares das Juntas. | 61 |
| Tabela 10 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg. | 62 |
| Tabela 11 – Valores dos parâmetros de Denavit-Hartenberg. | 63 |
| Tabela 12 - Dimensão da seção do tubo de PVC utilizado. | 68 |
| Tabela 13 - Torques calculados com a Primeira abordagem. | 69 |
| Tabela 14 – Torques calculados com a Segunda abordagem. | 72 |
| Tabela 15 - Torques necessários nas Juntas com FS = 1,36. | 73 |
| Tabela 16 – Atuadores selecionados. | 74 |
| Tabela 17 - Propriedades mecânicas do Plástico PLA (MATWEB, 2018). | 76 |
| Tabela 18 - Parâmetros de entrada projeto de engrenagens. | 77 |
| Tabela 19 - Resultados projeto de engrenagens. | 81 |
| Tabela 20 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1045 laminado a frio. | 84 |
| Tabela 21 – Forças, momentos e reações nos eixos. | 84 |
| Tabela 22 - Diâmetros dos eixos mínimo para evitar falha estática, por fadiga, por deflexão por flexão e por deflexão por torção. | 93 |
| Tabela 23 - Dimensões das chavetas dimensionadas. | 94 |
| Tabela 24 - Rolamentos selecionados. | 95 |
| Tabela 25 - Lista de componentes do Robô. | 101 |
| Tabela 26 - Custos mockup e protótipo. | 115 |
| Tabela 27- Especificações Técnicas Ortobras ULX (Ortobras, 2018). | 164 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | |
|---------|---------------------------------------|
| a | Distância em x_i |
| A | Matriz de transformação homogênea |
| $\{A\}$ | Sistema de coordenadas A |
| $\{B\}$ | Sistema de coordenadas B |
| C | Cosseno |
| d | Distância em z_{i-1} |
| d | Diâmetro do Tubo |
| E | Módulo de Elasticidade ou de Young |
| M | Momento Fletor Interno na Viga |
| f | Força |
| F | Força no Centro de Gravidade |
| n | Momento |
| N | Momento em relação ao centro de massa |
| m | Massa |
| k | Rigidez |
| l | Comprimento da viga |
| I | Momento de Inércia |
| J | Jacobiano |
| P | Vetor de Translação |
| R | Matriz de Rotação |
| x | Vetor posição do Efetuador terminal |
| $\{S\}$ | Sistema de coordenadas |
| S | Seno |
| t | Tempo |
| T | Matriz de Transformação |
| v | Velocidade linear |
| V | Velocidade |
| Q | Vetor Posição |
| FS | Fator de Segurança |
| y | Deflexão |
| w | Largura da Viga |

Símbolos Gregos

| | |
|----------|--|
| α | Ângulo em torno de x_i |
| Δ | Variação entre duas grandezas similares |
| θ | Ângulo em torno de z_{i-1} |
| Ω | Velocidade angular do sistema de coordenadas |
| ω | Velocidade angular |
| τ | Vetor do momento |
| ρ | Raio de curvatura |

Subscritos

| | |
|---------|------------------|
| ORG | Origem |
| $médio$ | Média Aritmética |

| | |
|------------------|-------------|
| <i>JACO</i> | WMRA JACO |
| <i>Manus Arm</i> | WMRA iARM |
| <i>Weston</i> | WMRA Weston |
| <i>Kares</i> | WMRA Kares |
| <i>Mats</i> | WMRA Mats |
| <i>USF</i> | WMRA USF |
| <i>Rapuda</i> | WMRA Rapuda |

Sobrescritos

- Variação temporal

Siglas

| | |
|---------|--|
| ABRAFIN | Associação Brasileira de Fisioterapia Neurofuncional |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ADL | <i>Activities of Daily Living</i> |
| AGMA | <i>American Gear Manufacturers Association</i> |
| CAT | Comitê de Ajudas Técnicas |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| DFA | <i>Design for Assembly</i> |
| DFM | <i>Design for Manufacturing</i> |
| D-H | Denavit-Hartenberg |
| GL | Grau de Liberdade |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| iARM | <i>Intelligent Arm Robot Manipulator</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MVP | <i>Minimum Viable Product</i> |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PIC | <i>Peripheral Interface Controller</i> |
| RAPUDA | <i>Robotic Arm for People with Upper limb disabilities</i> |
| RIA | <i>Robot Institute of America</i> |
| SCARA | <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> |
| TA | Tecnologia Assitiva |
| TEP | Trem de Engrenagens Epicloidsais |
| USF | <i>University of South Florida</i> |
| WMRA | <i>Wheelchair mounted Robotic Arm</i> |
| RTB | <i>Robotics Toolbox for MATLAB</i> |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A constante busca por eficiência e precisão nas indústrias faz com que os robôs industriais desempenhem cada vez mais um importante papel nesses ambientes. Além disso, diversos avanços vêm sendo realizados tanto na parte teórica quanto técnica da robótica e no poder computacional, o que faz com que o interesse de desenvolver robôs, que ajam em colaboração com os seres humanos, para atividades assistivas ganhe força (Wang, Suga, & Sugano, 2010).

As tecnologias assistivas têm por finalidade permitir que pessoas com algum tipo de deficiência possam realizar atividades diárias básicas (*ADLs – Activities of Daily Living*) de maneira fácil e efetiva (Capille, Carey, M. Alqasemi, & Dubey, 2011). Tal objetivo ajuda a melhorar a qualidade de vida dessas pessoas pois promove mais independência e autonomia para se relacionar com o ambiente ao seu redor.

Tecnologia Assistiva (TA) é o termo utilizado para categorizar todos os recursos e serviços que proporcionam ou ampliam habilidades funcionais de pessoas com algum tipo de deficiência (Bersch & Tonolli, 2006, apud Bersch, 2017). Uma citação que ilustra o papel da TA é que:

“Para as pessoas sem deficiência a tecnologia torna as coisas mais fáceis. Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis” (Radabaugh, 1993, apud Bersch, 2017, p.2).

No Brasil, no âmbito da Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República, em 16 de Novembro de 2006, pela portaria nº 142, o Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) foi instituído. A finalidade do CAT é de aperfeiçoar, dar transparência e legitimidade ao desenvolvimento da TA no Brasil (Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República - SDH/PR, 2009). Vale destacar que o termo Ajudas Técnicas, presente no nome do Comitê, é um termo antigo ao que hoje se entende por Tecnologia Assistiva.

O conceito brasileiro de Tecnologia Assistiva aprovado pela CAT é:

“Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação, de pessoas com deficiência, incapacidades ou

mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social”.

(Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República - SDH/PR, 2009)

O trabalho no desenvolvimento das TAs é um assunto que não se limita somente as áreas de ciência, tecnologia e saúde. Para a efetiva promoção dos Direitos Humanos as TAs são fundamentais, pois dão a oportunidade das pessoas alcançarem independência e autonomia em todas as esferas da sua vida. Garantir que investimentos sejam feitos nessa área e pesquisas desenvolvidas se tornam importantes medidas a serem adotadas para assegurar que os desafios e obstáculos à acessibilidade sejam eliminados (Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República - SDH/PR, 2009).

A ONU (United Nations, 2018) estimou que aproximadamente 15% da população mundial, algo em torno de 1 bilhão de pessoas, vive com algum tipo de deficiência. O percentual de pessoas com algum tipo de deficiência é ainda maior entre os idosos chegando a 46% destes. A ONU (United Nations, 2016) afirma ainda que 80% das pessoas portadoras de algum tipo de deficiência estão em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Ser portador de alguma deficiência aumenta, em média, o custo de vida em um terço da renda, num cenário onde 50% dessas pessoas não conseguem pagar por serviços de saúde.

No Brasil, de acordo com o último Censo Demográfico do IBGE, 45,6 milhões de pessoas declararam ter algum tipo de deficiência, seja do tipo auditiva, visual, motora ou mental, representando 23,9% da população total brasileira e, se considerado só as pessoas com deficiência motora o número é de 6,96% da população total brasileira, ou seja, mais de 13 milhões de pessoas (IBGE, 2010). Apesar disso, poucas são as políticas e incentivos para promover uma maior acessibilidade.

Nesse contexto, uma categoria de Tecnologia Assistiva que ganha força é a Robótica de Reabilitação. O presente trabalho se concentra em disfunções relacionadas a lesão medular, mais especificamente nas deficiências da coluna cervical da vértebra 3 a vértebra 5, nas quais o uso de braços robóticos são mais apropriados (M. Alqasemi, J. McCaffrey, D. Edwards, & V. Dubey, 2005). O uso de braços robóticos pode em muito beneficiar as pessoas que utilizam cadeiras de rodas elétricas, uma vez que a bateria que aciona esta pode acionar também o manipulador robótico em questão.

Braços robóticos montados sobre cadeiras de rodas (*WMRA – Wheelchair Mounted Robotic Arm*) são um dos tipos de robôs que fazem parte da Robótica de Reabilitação. Uma WMRA é combinação entre um manipulador robótico e uma cadeira de rodas motorizada, servindo de plataforma de montagem e fonte de energia para o robô (Wang, Suga, & Sugano, 2010). As WMRA são centradas no ser humano, isso significa, que por ter uma interação muito próxima entre pessoa e robô, são necessários sensores avançados, controle confiável e robustez do sistema para garantir que a aplicação seja efetiva e segura.

Durante a última década, diversas tentativas foram realizadas com o intuito de desenvolver e aperfeiçoar as WMRA, contudo poucas delas são efetivas em cumprir seu objetivo (Papadakis Ktistakis & G. Bourbakis, 2015). Um dos principais desafios é manter o custo de uma WMRA baixo e acessível para a maior parcela da população, sem abrir mão da efetividade do robô e da segurança do usuário.

1.2 OBJETIVOS

Diante de toda a contextualização apresentada, o presente trabalho visa realizar o projeto mecânico e construção de um protótipo de baixo custo de um braço manipulador para ser montado em uma cadeira de rodas elétrica com a finalidade de auxiliar pessoas com deficiência motora dos membros inferiores e superiores.

Serão analisadas diversas WMRA comerciais e WMRA desenvolvidas no ambiente universitário a fim de se chegar às decisões de projeto necessárias para garantir efetividade, segurança e baixo custo.

1.3 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A metodologia de projetos adotada para o presente trabalho possui 10 etapas (Norton, 2013):

1. Identificação das necessidades: consiste na exposição do problema sem uma definição clara ainda de qual caminho para solucionar será seguido. Corresponde a Contextualização;
2. Pesquisa de suporte: consiste no levantamento de informações a fim de definir os objetivos do projeto, tornando o problema mais claro e compreensível. Corresponde a Revisão Bibliográfica;
3. Definição dos objetivos: com as necessidades levantadas e com a pesquisa de suporte em mãos é possível estabelecer qual é o objetivo do projeto;
4. Especificações de Tarefas: consiste na etapa onde se decide quais serão as tarefas específicas a serem realizadas pela máquina, o que limita o problema;
5. Síntese e Concepção: consiste na exposição e no confronto de várias alternativas de soluções para o problema. O objetivo aqui é pensar no máximo de soluções possíveis sem avaliar com muita minúcia o valor e qualidade das ideias;
6. Análise: consiste em analisar as soluções da etapa anterior a fim de comparar pragmaticamente os prós e contras de cada uma;
7. Seleção: consiste na definição de qual será a solução adotada para resolver o problema;
8. Projeto detalhado: consiste na realização de todos os cálculos e desenhos de detalhes de conjunto. O objetivo aqui é ter todas as especificações definidas e prontas para serem

entregues aos fabricantes e fornecedores das peças. Corresponde ao Projeto Mecânico de fato;

9. Protótipo e teste: consiste na construção de um primeiro protótipo do produto a fim de testá-lo e identificar nele eventuais erros de projeto e oportunidades de melhoria;
10. Produção: com os testes realizados é possível fazer as alterações necessárias no projeto e enviar este para produção em escala.

A metodologia acima, apesar de parecer algo linear e sequencial, é altamente iterativa. Exigindo ciclos de melhoria contínua entre as etapas de maneira constante e repetitiva. Todas as etapas apresentam-se intrinsicamente relacionadas, ou seja, uma mudança em uma determinada fase pode acarretar em mudanças não só nas etapas que a sucedem, mas também nas que antecedem.

Estes ciclos de iteração podem se constituir como uma grande armadilha, pois a tendência natural é de querer aperfeiçoar o produto de maneira a minimizar todas as suas eventuais falhas e problemas antes do seu lançamento e prototipagem, acarretando em ciclos que não se acabam. Contudo, é fundamental que o projetista saiba declarar quando o projeto está bom o suficiente para ser prototipado (Norton, 2013).

Como um dos principais objetivos neste trabalho é o de reduzir custos, sem perder a efetividade e segurança do robô, faz-se útil adotar o conceito de produto mínimo viável (*MVP – Minimum Viable Product*), ou seja, de declarar o projeto como o bom suficiente para prototipagem quando, com o mínimo de recursos possíveis, tenha suas funções garantidas para resolver o problema, mesmo que à primeira vista pareça que ainda existam pontos a serem melhorados antes de prototipar (Endeavor Brasil, 2015).

Com a metodologia definida e as considerações feitas acima, decidiu-se por organizar o trabalho da seguinte forma:

- Introdução: esta seção contempla os pontos relativos à Identificação de Necessidades e Definição dos Objetivos;
- Revisão Bibliográfica: esta seção abrange a Pesquisa de Suporte realizada para a execução do projeto;
- Projeto Conceitual: esta seção contempla os pontos relativos à Especificação de Tarefas, Síntese e Concepção, Análise e Seleção;
- Projeto Mecânico: esta seção abrange o Projeto Detalhado do robô;
- Protótipo e Teste: validação do projeto por meio de um protótipo, identificando eventuais falhas de projeto e oportunidades de melhoria;

- Conclusão: esta seção será responsável por mostrar quais são os próximos ciclos de melhoria que podem ser realizados no projeto a fim de garantir que este esteja apto para a etapa de Produção;
- Referências Bibliográficas, Anexos e Apêndices: esta seção contempla todo o arcabouço teórico consultado para o desenvolvimento do projeto e, ainda, todos os materiais criados e consultados para complementar as informações das seções anteriores.

A Figura (1) ilustra o fluxo do projeto do ponto de vista da organização do trabalho e da metodologia adotada:

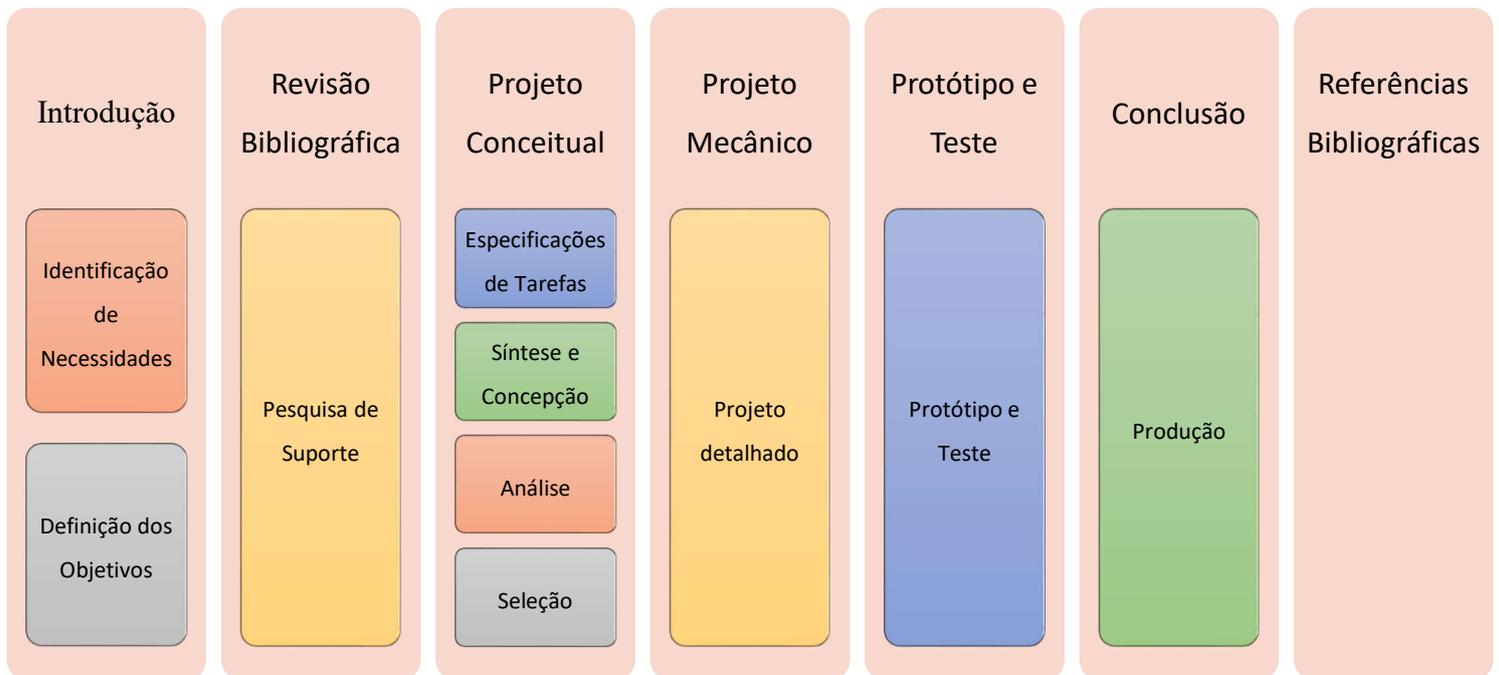


Figura 1 - Fluxo da Organização e Metodologia do Projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LESÃO MEDULAR

A Associação Brasileira de Fisioterapia Neurofuncional (ABRAFIN, 2018) caracteriza uma Lesão Medular como sendo a interrupção parcial ou total do sinal neurológico por meio da medula, o que acarreta perda de sensibilidade da altura da lesão para baixo, paralisia e, ainda, alterações em outros sistemas do organismo humano, como por exemplo, o urinário e o intestinal. Esta interrupção pode ser causada por um trauma, doença ou por uma manifestação espontânea desde o nascimento da pessoa (Instituto Novo Ser, 2018).

A coluna vertebral (Kalil, 2011) consiste de um empilhamento de vértebras, que são separadas por discos de cartilagem, e conectadas umas às outras por meio de articulações. São 33 vértebras no total, sendo estas divididas em cinco grupos: 7 vértebras cervicais, 12 torácicas, 5 lombares, 5 sacrais e, ainda, 4 coccígeas. A Figura (2) ilustra essa categorização:

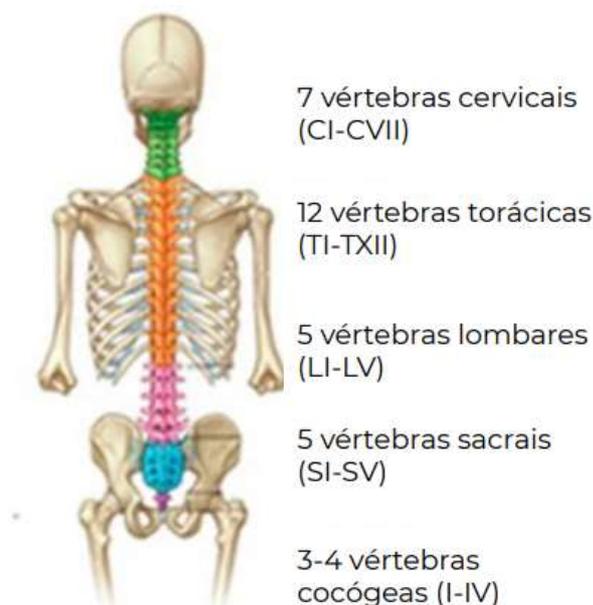


Figura 2 - Coluna Vertebral. Adaptado de (Instituto Novo Ser, 2018).

Alterações nas vértebras, sejam elas traumáticas ou não, podem impedir que a circulação interna da medula ocorra. Tal impedimento compromete toda a região inervada, do dermatomo, abaixo da vértebra avariada, prejudicando a movimentação e sensibilidade corporal da pessoa nessa região. A Figura (3) ilustra o dermatomo humano:

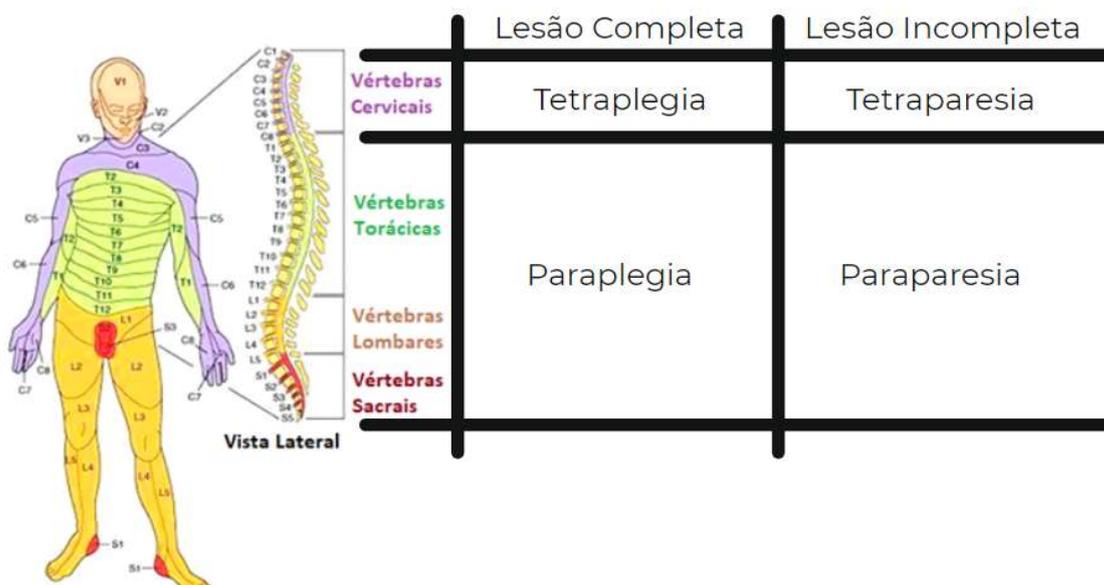


Figura 3 - Dermátomo humano. Adaptado de (Instituto Novo Ser, 2018).

Para se classificar o tipo de lesão e compreender o grau de limitação dois fatores são analisados: o nível de lesão e o tamanho da lesão (ABRAFIN, 2018). O primeiro diz respeito à altura da lesão, se esta está mais alta ou mais baixa em relação ao dermatomo. Já o segundo visa identificar se a lesão é completa ou incompleta, ou seja, se há uma limitação total ou parcial, respectivamente, na atividade motora voluntária e sensibilidade no nível de lesão até o grupo Sacral de vértebras.

Com isso, pode-se diferenciar, no caso de lesões completas, a paraplegia da tetraplegia. A primeira está relacionada a lesões nos grupos de vértebras torácicas, lombares ou sacrais, ou seja, grande comprometimento dos membros inferiores. Já o segundo está relacionado a lesões no grupo cervical, o que é caracterizado por um grande comprometimento dos membros superiores e também dos inferiores. No caso de lesões incompletas, pode-se ter a paraparesia e a tetraparesia, que correspondem de maneira análoga, respectivamente, à paraplegia e à tetraplegia para o caso de perda parcial de motricidade e sensibilidade (ABRAFIN, 2018).

Como já mencionado, o uso de braços robóticos são mais apropriados para pessoas que possuem lesões medulares no grupo cervical da vértebra 3 a vértebra 5 (M. Alqasemi, J. McCaffrey, D. Edwards, & V. Dubey, 2005). Assim, é fundamental entender quais são as limitações e características, de maneira mais específica e profunda, que as lesões nessas vértebras causam às pessoas. As lesões (ABRAFIN, 2018) nas vértebras C1 a C3 fazem com que a pessoa necessite de assistência para respirar, a fala se torna bastante limitada, bem como os movimentos dos membros superiores, inferiores, pescoço e da cabeça. Soluções assistivas para esse grupo envolvem o uso da cabeça ou do queixo para o controle. Já a lesão na C4, em relação a C1 a C3, tem um quadro respiratório melhor e uma melhora dos movimentos da cabeça, pescoço e dos ombros. Além do controle pela cabeça e queixo, existe a possibilidade de utilizar também controle de voz para realizar as atividades. Por fim, a C5 apresenta

movimento do cotovelo, assim torna-se possível ao indivíduo levar sua mão ao rosto. Isso confere uma habilidade, mesmo que limitada, de realizar atividades básicas com as mãos.

2.2 DEFINIÇÃO DE ROBÔS MANIPULADORES

Definir o que caracteriza um robô manipulador, ou industrial, varia dependendo da instituição que está definindo. Apesar disso, é fundamental adotar quais serão os conceitos utilizados para o desenvolvimento e projeto do robô.

A definição da RIA (*Robot Institute of America*) é dada como sendo:

“Um robô industrial é um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas” (RIA, 1981, apud Santos, 2015, p.13).

Uma definição mais ampla e mais recente é a da norma ISO 10218 (*International Organization for Standardization*) que é apresentada da seguinte forma:

“Um robô industrial é uma máquina para manipulação, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial” (ISO 10218, 2011, apud Santos, 2015, p.13).

Com essas definições apresentadas, é possível entender um robô manipulador como sendo um braço mecânico acionado por atuadores a partir de um controlador, o qual funciona a partir de informações de movimentos que são programados e dos sinais gerados por sensores que realimentam o sistema (Santos, 2015).

2.3 ESTRUTURA GERAL BÁSICA DE UM ROBÔ

Os robôs têm funções e aplicações em diversas áreas e para várias finalidades, entre elas estão tarefas relacionadas à movimentação, medição e manipulação. Apesar dessa grande variedade, a estrutura geral básica de um robô pode ser entendida em seis partes fundamentais (Santos, 2015):

- Base fixa ou móvel: pode ser estática ou pode girar e deslizar por uma curta distância;

- Braço articulado (também chamado de manipulador mecânico ou manipulador robótico);
- Efetuador final (também chamado de efetuador terminal): é composto pelo punho e uma garra ou outra ferramenta específica, a depender da aplicação;
- Unidade de controle: é o computador embarcado no robô;
- Dispositivo de comando e programação: podem ser teclados, *teach box* ou *joystick*;
- Fonte de energia: pode ser hidráulica, pneumática ou elétrica dependendo das especificações e objetivos do projeto.

O enfoque principal a ser dado no presente trabalho será no manipulador robótico e em sua base. A anatomia do manipulador (Carrara, 2015) é composta pelos elos, juntas, punho e efetuador terminal. Os elos correspondem às partes rígidas do braço, os quais são unidos por meio das juntas em uma cadeia cinemática. Esta é uma cadeia cinemática aberta, ou seja, por um lado o braço é fixado a uma base e do outro há um punho, o qual corresponde a várias juntas próximas entre si, conectando elos de tamanho reduzido, o que possibilita a orientação do efetuador terminal nas posições desejadas. O efetuador terminal é o dispositivo para realizar a tarefa específica da aplicação. As Figuras (4) e (5) ilustram, respectivamente, a estrutura esquemática de um manipulador robótico e um exemplo de estrutura em um robô industrial real.

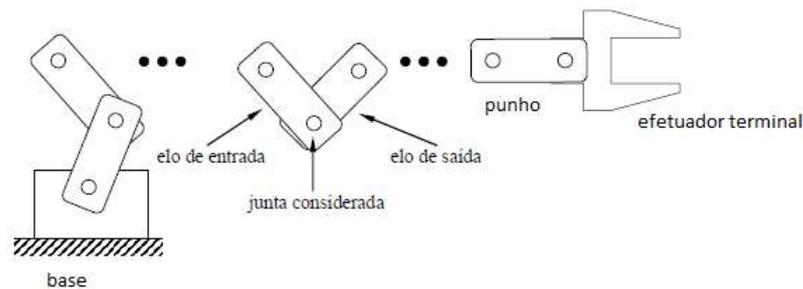


Figura 4 - Sequência de elos numa junta de um braço robótico. Adaptado de (Carrara, 2015).

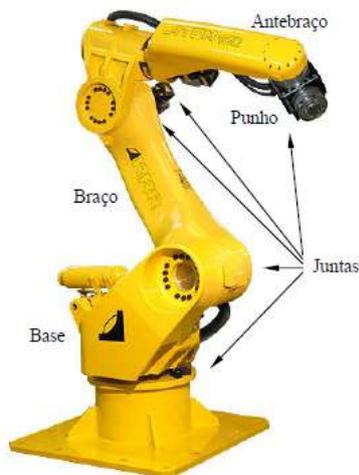


Figura 5 - Anatomia de um braço robótico real (Carrara, 2015).

As juntas de um robô apresentam um papel importante no estudo de um manipulador robótico. Três tipos de juntas são comumente encontradas, são elas: juntas prismáticas; juntas rotacionais; e, juntas esféricas. A primeira se refere a movimentos lineares, enquanto as duas últimas estão associadas a movimentos de revolução em torno de um ou mais eixos de rotação. Conforme os tipos de juntas e a configuração utilizada, é possível categorizar os manipuladores. Essa classificação (Santos, 2015) permite identificar algumas características comuns, como por exemplo:

- Volume de trabalho: região alcançável e manipulável do braço;
- Grau de rigidez mecânica do manipulador;
- Influência do sistema de controle na movimentação do braço.

Outro importante aspecto na análise de um braço robótico é o entendimento dos graus de liberdade (GLs). Estes determinam os movimentos do manipulador no espaço bidimensional e tridimensional. Para se conhecer o número de graus de liberdade do robô basta somar os graus de liberdade das suas juntas (Carrara, 2015). No geral um manipulador mecânico apresenta 6 graus de liberdade, sendo 3 GLs para posicionar o efetuator terminal e outros 3 GLs para orientá-lo

2.4 BRAÇOS ROBÓTICOS MONTADOS SOBRE CADEIRAS DE RODAS

O termo mais comum para se referir aos Braços Robóticos Montados sobre Cadeiras de Rodas vem do Inglês *Wheelchair Mounted robotic arms* (WMRAs). Uma WMRA consiste em um manipulador mecânico que se encontra acoplado a uma cadeira de rodas motorizada, que serve de base de montagem e fonte de energia para o robô (Wang, Suga, & Sugano, 2010). Tendo em vista que várias WMRAs vêm sendo desenvolvidas, faz-se necessário investigar quais são os tipos e principais características desses braços robóticos existentes.

a. JACO

Esse braço robótico é desenvolvido pela *Kinova Technology*, uma empresa canadense que oferece soluções em robótica assistiva. É composto por 6 GL (Kinova Technology, 2018), correspondendo aos movimentos de ombro, cotovelo e punho, o que permite movimentos diversos e suaves similares ao de um braço humano. A garra é de três dedos, o que possibilita pegar e segurar objetos de diferentes tamanhos. Existe ainda a possibilidade de usar apenas dois dos três dedos para executar funções mais simples. O material do braço é de fibra de carbono e ele é compatível com uma ampla variedade de cadeiras de rodas motorizadas, utilizando a fonte de energia da cadeira para se movimentar. O JACO permite o controle por diferentes interfaces, tais como *joystick*, controle pela cabeça, sopro e queixo.

A *Kinova*, com o JACO, Figs. (6) e (7), e outros robôs que oferta ao mercado, se posiciona como uma alternativa comercial bastante satisfatória. A empresa está entre as 25 empresas de manufatura que

mais crescem, devido a sua taxa de crescimento dos últimos 5 anos (acumulado de 723%), no Canadá (Canadian Business, 2018). Contudo, ainda é uma solução bastante cara para o usuário final tendo seu preço médio na casa dos R\$ 140.000,00.



Figura 6 - Usuário do JACO (Kinova Technology, 2018).



Figura 7 - Braço Robótico JACO (Kinova Technology, 2018).

b. Manus Arm (iARM)

O iARM (*Intelligent Arm Robot Manipulator*) é um manipulador robótico fabricado pela *Exact Dynamics*, uma empresa europeia que faz parte do grupo *Assistive Innovations* com operação em vários países. Este manipulador é uma evolução do antigo Manus Arm. O manipulador é composto por 7 GLs (Exact Dynamics, 2018). Seu acionamento é elétrico por meio de servo motores que são posicionados na base do braço e sua garra possui dois dedos. Seu controle é feito por meio de um *joystick*, teclado ou

por botão único. Essa solução comercial chega ao usuário final na casa dos R\$ 72.000,00. A Figura (8) ilustra o iARM:



Figura 8 – Usuário do iARM (Exact Dynamics, 2018).

c. Weston Wheelchair

A Weston Wheelchair é uma WMRA desenvolvida na *Bath Insitute of Medical Engineering* no Reino Unido (Hillman, Hagan, Hagan, Jepson, & Orpwood, 2002). Este manipulador consiste de um atuador vertical (junta prismática) montado à cadeira de rodas com as juntas rotativas principais do braço restringidas a se movimentar no plano horizontal, configurando-se como um robô SCARA. As Figuras (9) e (10) mostram a configuração do braço e a estrutura completa montada à cadeira de rodas, respectivamente.

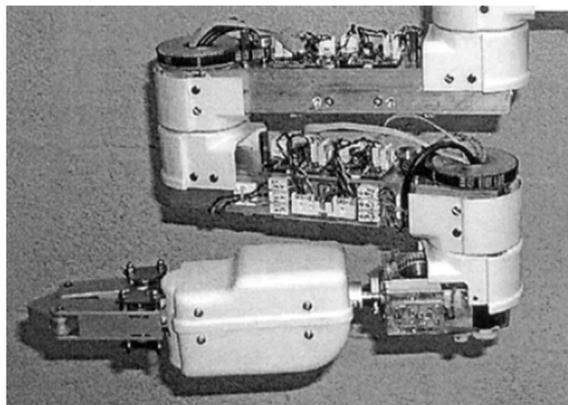


Figura 9 – Estrutura das juntas rotativas do braço do Weston Wheelchair (Hillman, Hagan, Hagan, Jepson, & Orpwood, 2002).



Figura 10 – Usuário do Weston Wheelchair (Hillman, Hagan, Hagan, Jepson, & Orpwood, 2002).

d. Raptor Arm

O Raptor Arm é um braço robótico desenvolvido pela *Applied Resources* (Papadakis Ktistakis & G. Bourbakis, 2015). Este manipulador conta com 4 GLs e uma garra plana, tendo seu controle realizado por um *joystick* ou por um controle de 10 botões. Um ponto importante de ser destacado é que esse braço não conta com encoders, o que faz com que seu controle em coordenadas cartesianas não seja possível. A simplicidade do Raptor faz com que seu custo seja aproximadamente a metade do custo do iARM, ou seja, em torno de R\$ 36.000,00 (D. Edwards, 2005). A Figura (11) ilustra uma foto desta WMRA:



Figura 11 - Raptor Arm (D. Edwards, 2005).

e. DORA

É um manipulador robótico desenvolvido na *University of Massachusetts, Lowell*. Consiste em uma WMRA de 7 GLs que utiliza apenas 4 atuadores (Rapacki, 2009). O braço conta com duas juntas rotativas e uma junta prismática, conforme mostrado na Fig. (12). A Figura (13) apresenta uma foto do DORA.

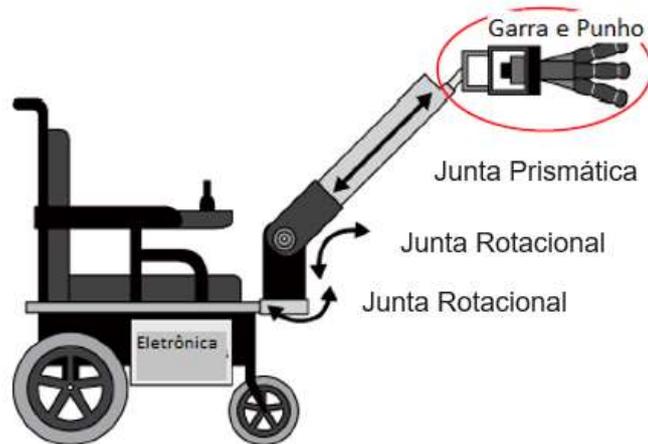


Figura 12 - Esquema do design do DORA. Adaptado de (Rapacki, 2009).

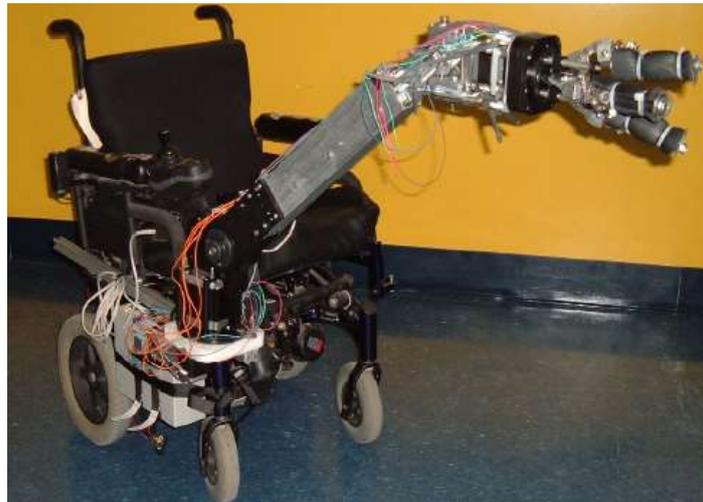


Figura 13 – DORA.

f. KARES System

O KARES (Song, Lee, Kim, Yoon, & Bien, 1998), um robô da *KAIST Rehabilitation Engineering System*, tem 6 graus de liberdade. Possui um *payload* de 500 g e um comprimento de braço de 82 cm. A massa média é de 22,9 kg e a massa dos motores de passo no efetuator terminal é de 11,6 kg, conforme mostrado na Fig. (14). Esse robô foi concebido para executar quatro funções primordiais: pegar um copo sobre uma mesa; pegar uma caneta no chão; mover o objeto até a altura do rosto do usuário; e, abrir uma porta. O público-alvo são as pessoas com deficiências nas vértebras 4, 5 e 6 da coluna vertebral.



Figura 14 – Usuário do KARES (Song, Lee, Kim, Yoon, & Bien, 1998).

g. Mats

O Mats (Balaguer, et al., 2006) é um braço manipulador desenvolvido no laboratório de Robótica da *University of Carlos III* na Espanha. Ele possui 5 graus de liberdade e um alcance de 1,3 m, com massa de 11 kg. Esse manipulador apresenta a característica de poder ser utilizado de forma simétrica, uma vez que ele pode funcionar na cadeira de rodas ou fora dela. Ele apresenta a capacidade de ser montado tanto na cadeira de rodas quanto em outras superfícies e, assim, as duas extremidades de sua cadeia cinemática devem funcionar como base e garra, dependendo de como estiver posicionado. As Figuras (15) e (16) ilustram, respectivamente, o aspecto cinemático do robô Mats e a simetria deste.

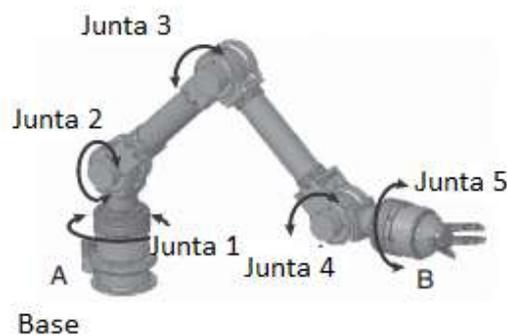


Figura 15 - Aspecto Cinemático do Mats. Adaptado de (Balaguer, et al., 2006).



Figura 16 - Simetria do Robô Mats (Balaguer, et al., 2006).

h. University of South Florida (USF)

O robô desenvolvido na *University of South Florida*, Estados Unidos, (D. Edwards, 2005) teve por objetivo de projeto atender as necessidades dos potenciais usuários das WMRAs e de reduzir os custos, que são elevados, associados a esse tipo de equipamento. O manipulador robótico conta com servo motores em cada junta, sendo que possui 7 graus de liberdade. Apresenta ainda um *payload* de 6 kg, conta com uma massa total de 14 kg e tem um alcance máximo de 1,37 m. A Figura (17) apresenta o robô da USF na posição de alimentação.



Figura 17 - Robô da USF na posição de alimentação (D. Edwards, 2005).

i. RAPUDA

O RAPUDA (*Robotic Arm for People with Upper limb DisAbilities*) foi desenvolvido na *AIST's Intelligent Systems Research Institute*. Este robô (Deyle, 2010) conta com 6 graus de liberdade no braço e mais 1 grau de liberdade na garra, tem um alcance máximo de 100 cm e apresenta uma massa de aproximadamente 6 kg. O *payload* deste manipulador é de 500 g. Uma característica, em especial, deste robô é que seu braço é telescópico, ou seja, possui uma junta prismática que permite que o comprimento deste seja alterado dependendo da tarefa que está realizando. A maneira com que consegue fazer isso se deve a uma série de módulos pequenos que se conectam de forma a estender ou contrair o ele correspondente ao ombro do robô. As Figuras (18) e (19) apresentam, respectivamente, um usuário do RAPUDA e uma ilustração do mecanismo telescópico nele presente.



Figura 18 - Usuário do RAPUDA (Deyle, 2010).

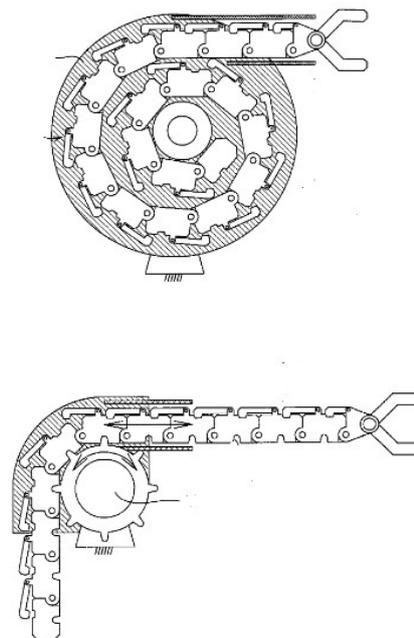


Figura 19 - Mecanismo Telescópico do RAPUDA (Deyle, 2010).

2.5 CADEIRA DE RODAS

No contexto da aplicação assistiva do presente projeto, o entendimento sobre as características principais das cadeiras de rodas se torna indispensável. Este equipamento precisa ser capaz de atender as necessidades do seu usuário, oferecendo conforto, segurança, durabilidade e uma estética agradável. Afinal, mais do que possibilitar benefícios funcionais, a cadeira de rodas desempenha um importante papel na melhora da autoestima e autoconfiança do usuário, uma vez que este pode se tornar mais independente e ter mais controle sobre sua vida diária em decorrência do uso deste equipamento.

A OMS (Organização Mundial da Saúde, 2012) define uma cadeira de rodas como apropriada como sendo aquela que é capaz de atender as necessidades do seu tipo de usuário e de seu ambiente, ou seja, ela precisa possibilitar que o usuário faça com facilidade o que queira fazer. A partir disso também são apresentadas as partes principais que compõem uma cadeira de rodas, conforme Fig. (20):

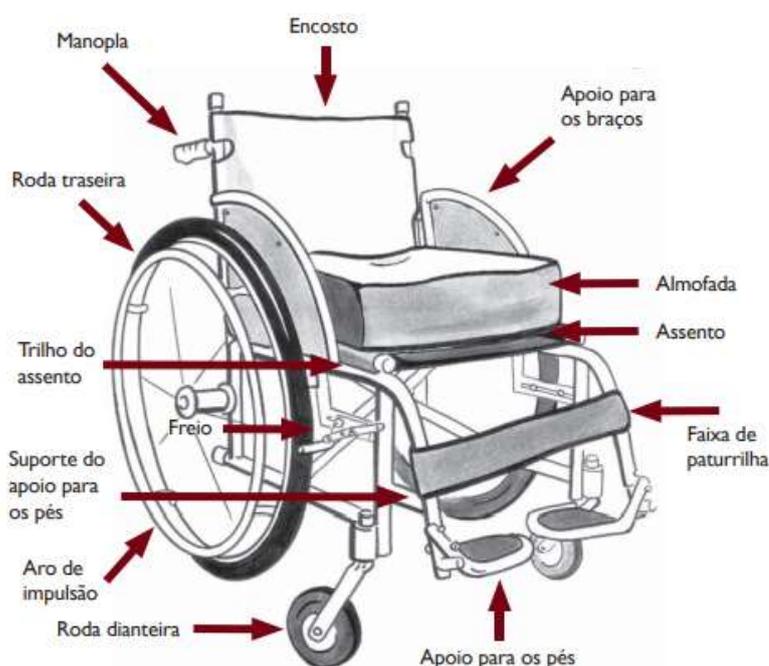


Figura 20 - Partes de uma Cadeira de Rodas típica (Organização Mundial da Saúde, 2012).

O conhecimento das partes principais e das características de uma cadeira de rodas é importante pois estes afetam facilmente a capacidade do usuário de realizar atividades cotidianas se mal dimensionados ou fabricados. Assim, atenção em especial deve ser dada ao impacto que qualquer alteração na estrutura geral da cadeira pode causar.

Diante desse contexto, a NBR 9050 (ABNT, 2015) traz critérios e parâmetros técnicos a serem observados nas cadeiras de rodas e na construção de lugares com acessibilidade. A Figura (21) apresenta algumas referências em termos das dimensões que cadeira de rodas manuais ou motorizadas devem possuir. Já a Figura (22) traz a projeção, chamado de módulo de referência no piso ocupada por uma pessoa que utiliza o equipamento seja ele motorizado ou não:

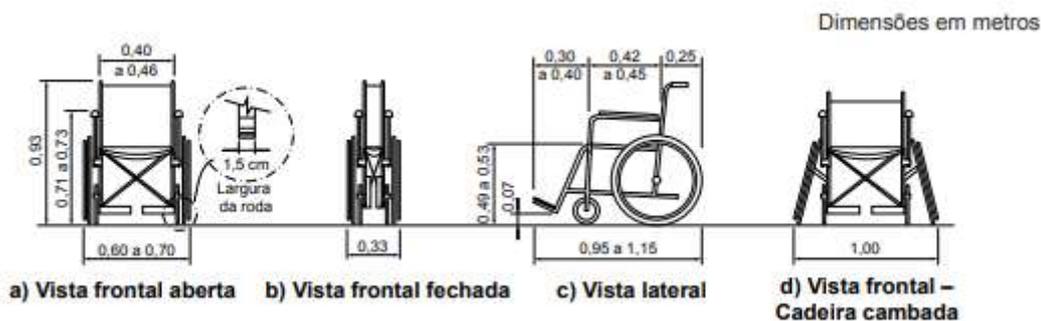


Figura 21 - Cadeira de rodas manual, motorizada e esportiva (ABNT, 2015).

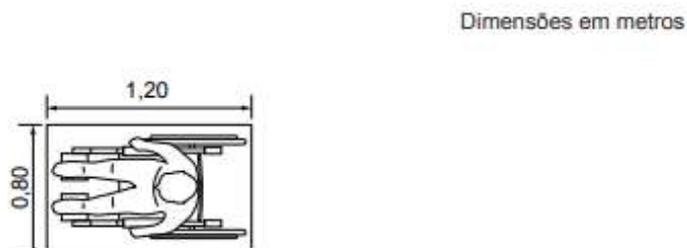


Figura 22 - Dimensões do módulo de referência (ABNT, 2015).

Além disso, outro aspecto relevante que a norma traz diz respeito a área de circulação e manobra necessária na construção de locais acessíveis para cadeirantes. A Figura (23) apresenta a largura para deslocamento em linha reta de pessoas em cadeira de rodas. Já as Figuras (24) e (25) apresentam a área para manobra de cadeiras de rodas sem deslocamento e com deslocamento, respectivamente:

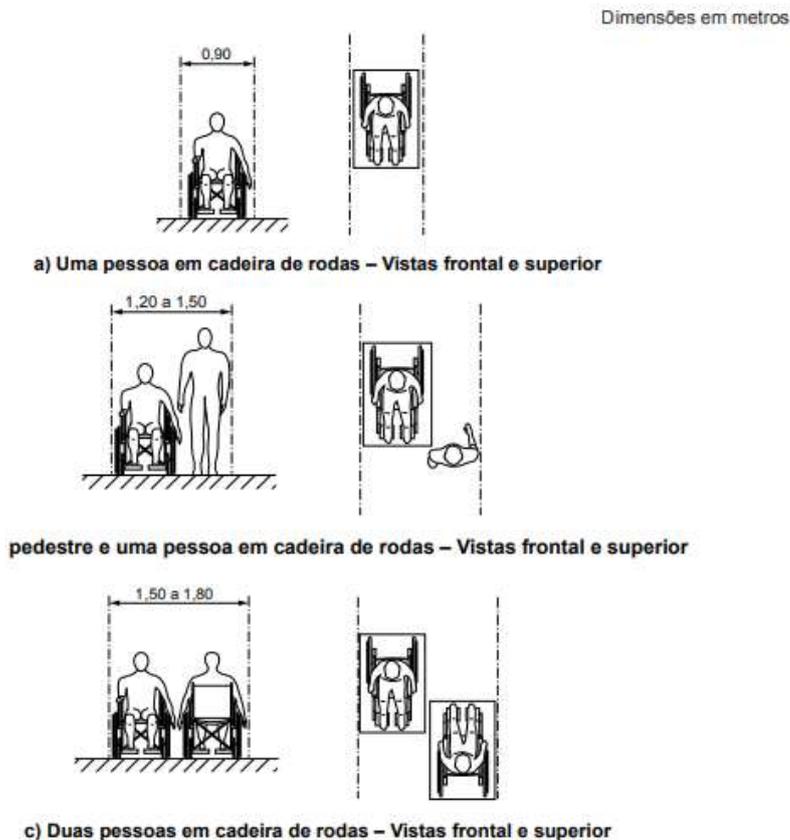


Figura 23 - Largura para deslocamento em linha reta (ABNT, 2015).

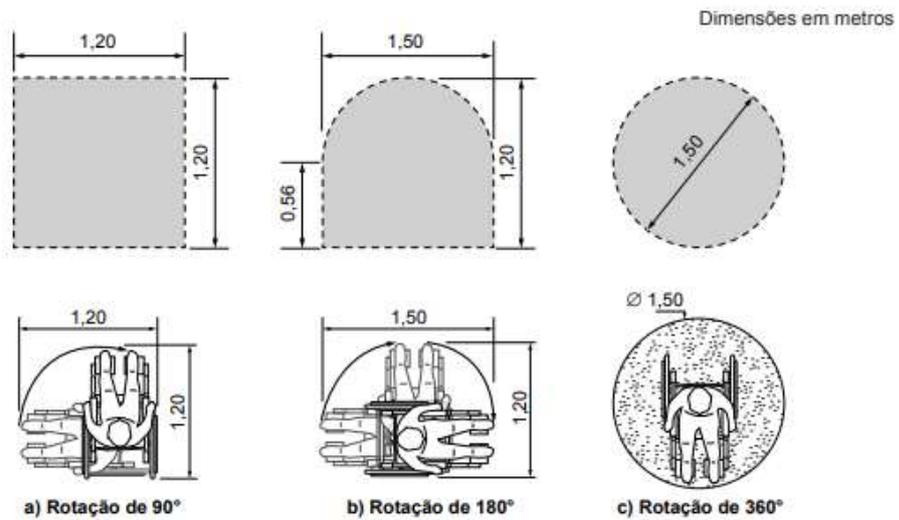


Figura 24 - Área para manobra de cadeira de rodas sem deslocamento (ABNT, 2015).

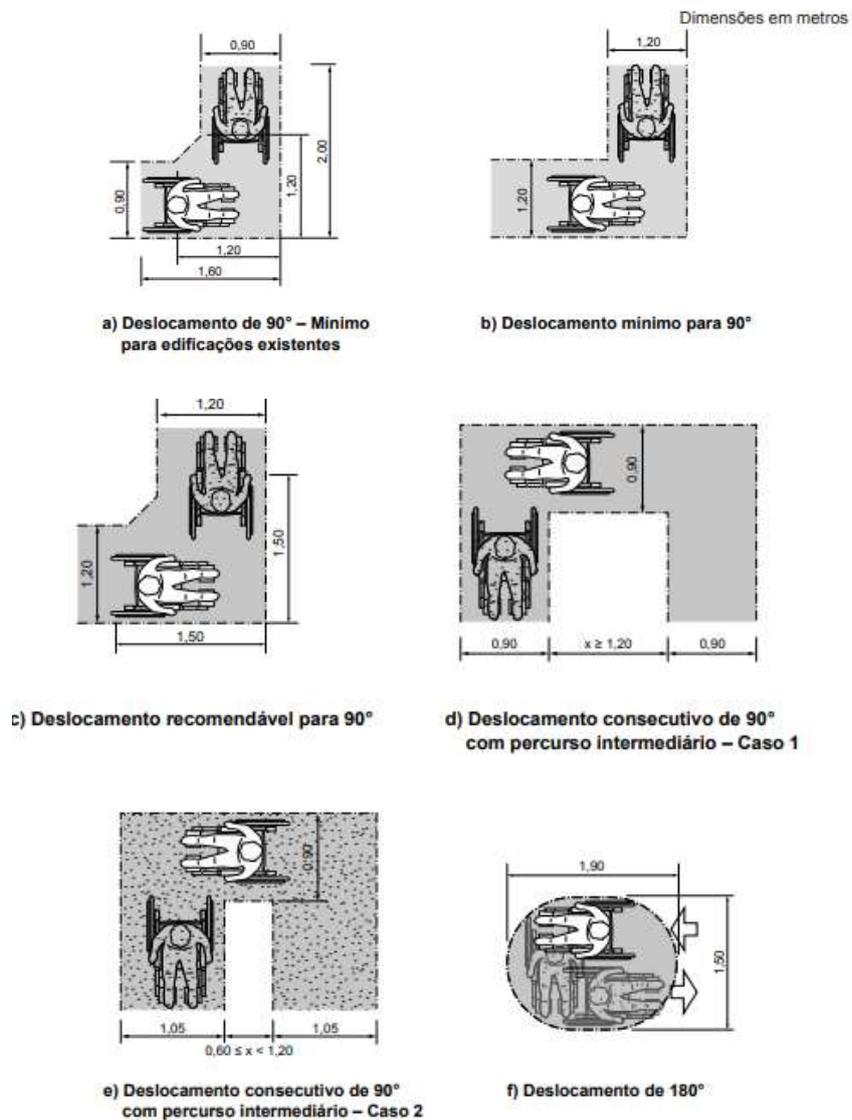
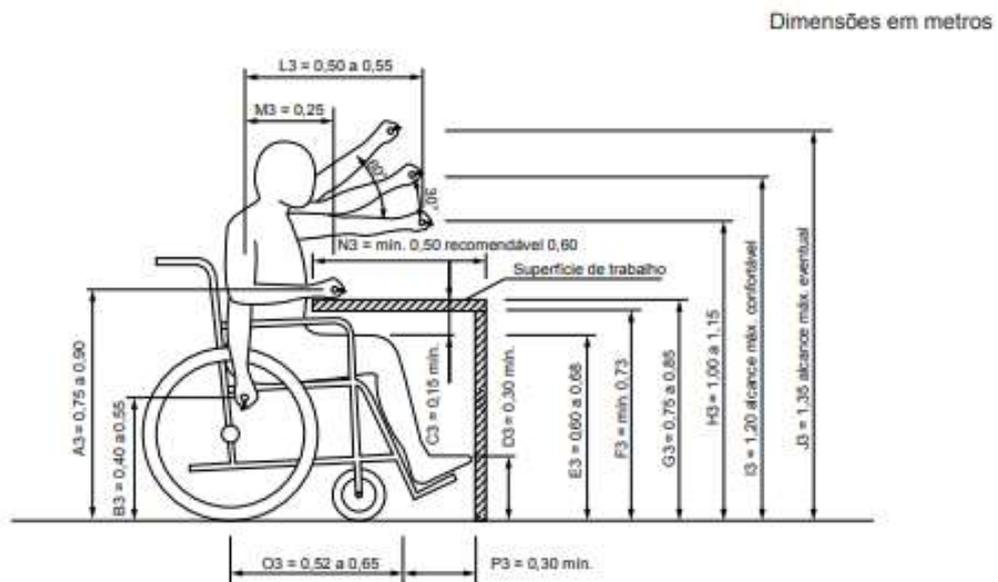


Figura 25 - Área para manobra de cadeira de rodas com deslocamento (ABNT, 2015).

Por fim, a NBR 9050 ainda fornece os alcances manual frontal e lateral sem e com deslocamento de tronco que um cadeirante, com movimentos dos membros superiores não comprometido, conseguir, conforme Figuras. (26), (27) e (28):



Legenda

- A3 altura do centro da mão, com o antebraço formando 90° com o tronco
- B3 altura do centro da mão estendida ao longo do eixo longitudinal do corpo
- C3 altura mínima livre entre a coxa e a parte inferior de objetos e equipamentos
- D3 altura mínima livre para encaixe dos pés
- E3 altura do piso até a parte superior da coxa
- F3 altura mínima livre para encaixe da cadeira de rodas sob o objeto
- G3 altura das superfícies de trabalho ou mesas
- H3 altura do centro da mão, com o braço estendido paralelo ao piso
- I3 altura do centro da mão, com o braço estendido formando 30° com o piso = alcance máximo confortável
- J3 altura do centro da mão, com o braço estendido formando 60° com o piso = alcance máximo eventual
- L3 comprimento do braço na horizontal, do ombro ao centro da mão
- M3 comprimento do antebraço (do centro do cotovelo ao centro da mão)
- N3 profundidade da superfície de trabalho necessária para aproximação total
- O3 profundidade da nádega à parte superior do Joelho
- P3 profundidade mínima necessária para encaixe dos pés

Figura 26 - Alcance manual frontal com superfície de trabalho de um pessoa em cadeira de rodas (ABNT, 2015).

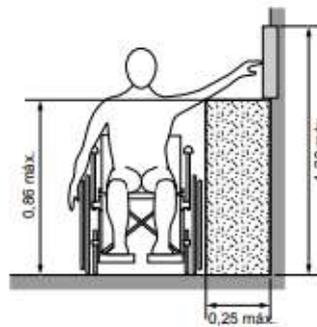
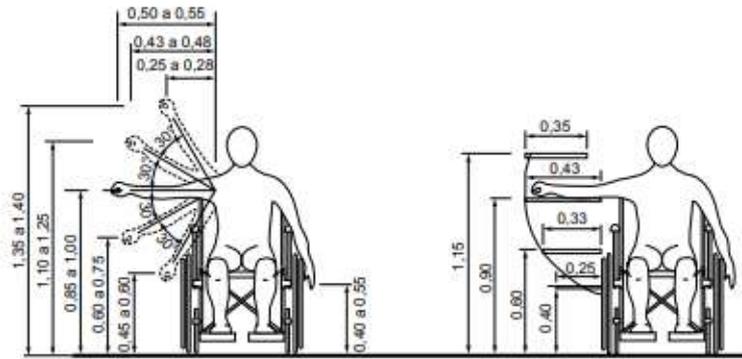


Figura 27 - Alcance manual lateral sem deslocamento de tronco (ABNT, 2015).

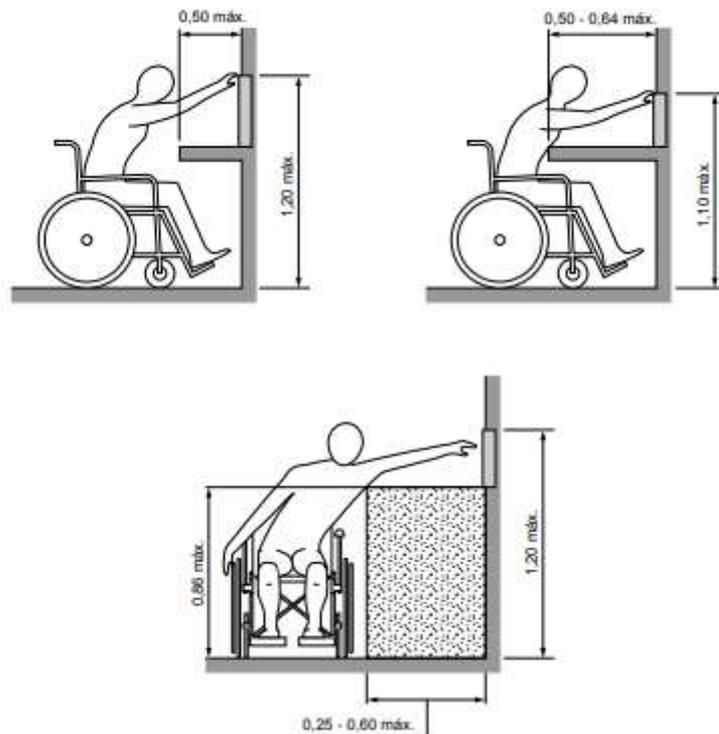


Figura 28 - Alcance manual lateral e frontal com deslocamento de tronco (ABNT, 2015).

2.6 CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES

Na cinemática de robôs manipuladores existem dois tipos de cinemática: a direta e a inversa. A primeira diz respeito ao problema no qual se deseja obter a posição e a velocidade do efetuador, a partir das variáveis de juntas. Já na segunda, o inverso é desejado, ou seja, deseja-se a partir da posição e velocidade do efetuador obter as posições e velocidades das juntas.

Uma maneira de se obter a cinemática direta é por meio da notação de Denavit-Hartenberg (D-H), que consiste em um método sistemático para descrever a posição e a orientação entre dois elos consecutivos, baseando-se no uso de transformações homogêneas (Cabral, 2017).

A Figura (29) servirá como um auxílio para o entendimento do método, descrito abaixo (Cabral, 2017):

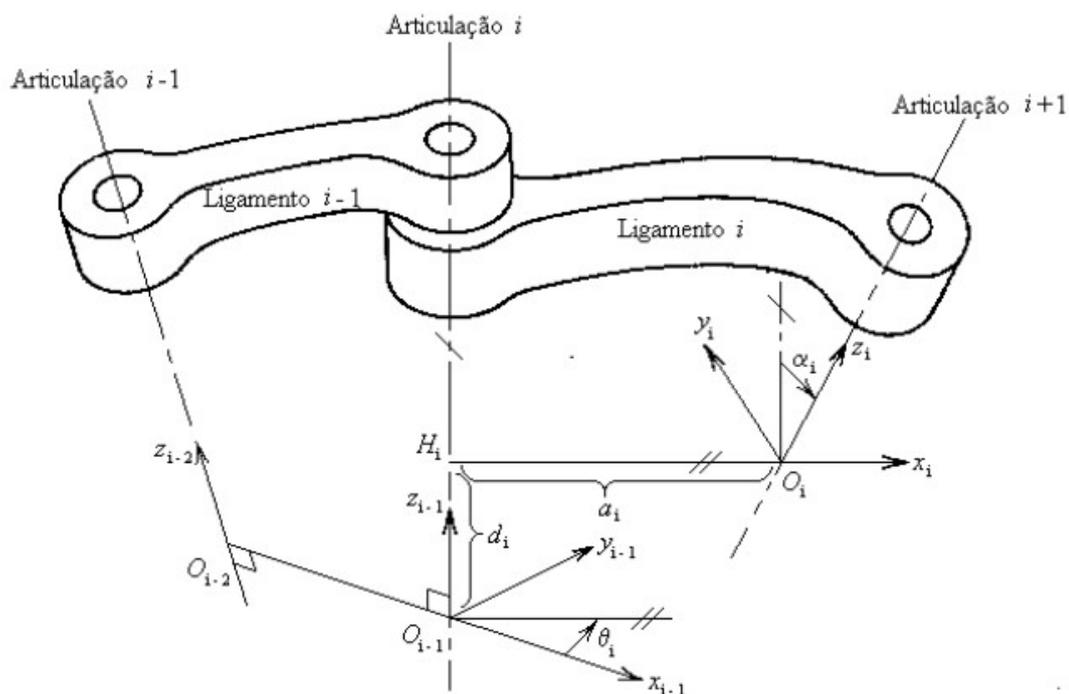


Figura 29 - Método D-H (Cabral, 2017).

1. Numerar todas as juntas de 1 a n;
2. Numerar todos os elos de 0 a n;
3. Localizar os eixos z ao longo dos eixos das juntas de modo que o eixo z_{i-1} seja o eixo da junta i ;
4. Obter a normal comum $H_i O_i$ para todos os elos. Ela é definida como sendo a normal comum entre os eixos i e $i + 1$, ou seja, entre os eixos z_{i-1} e z_i ;

5. A origem do sistema O_i é postada na interseção entre o eixo z_i (eixo da junta $i + 1$) e a normal comum entre os eixos z_{i-1} e z_i ;
6. Posiciona-se o eixo x_i ao longo desta normal comum, do item 5, na direção da extensão desta normal comum de z_{i-1} para z_i ;
7. Encontra-se o eixo y_i por meio da regra da mão direita;
8. Define-se a posição relativa entre dois sistemas de coordenadas consecutivos, $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ e $O_ix_iy_iz_i$, a partir da determinação das posições relativas entre os eixos x_{i-1} e x_i , e entre os eixos z_{i-1} e z_i . Essa determinação se dá por meio da obtenção de quatro parâmetros: a_i , α_i , d_i e θ_i .

a_i é a distância em módulo ao longo do eixo x_i entre z_{i-1} e z_i , ou seja, é a normal comum H_iO_i .

α_i é o ângulo com sinal em torno do eixo x_i entre z_{i-1} e z_i , de acordo com a regra da mão direita.

d_i é a distância com sinal ao longo do eixo z_{i-1} , a normal comum, entre os eixos x_{i-1} e x_i .

θ_i é o ângulo com sinal medido em torno de z_{i-1} entre o eixo x_{i-1} e x_i , de acordo com a regra da mão direita.

9. Define-se a posição e orientação do sistema de coordenadas i em relação ao sistema $i - 1$ por meio da matriz de transformações abaixo:

$${}_{i-1}^i\mathbf{A} = Rot(z, \theta_i)Trans(z, d_i)Trans(x, \alpha_i)Rot(x, \alpha_i) \quad (2-1)$$

$${}_{i-1}^i\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Essa matriz realiza as transformações de maneira sequencial, na qual a primeira delas consiste de uma rotação de um ângulo θ_i , de acordo com a regra da mão direita, em torno de z_{i-1} . A segunda e a terceira transformação diz respeito a translações ao longo do eixo z_{i-1} de uma distância d_i e ao longo do eixo x_i de uma distância a_i , respectivamente. Por fim, tem-se uma rotação de um ângulo α_i em torno de x_i , seguindo a regra da mão direita.

10. Obter a matriz de transformação homogênea ${}^i_0\mathbf{A}$:

$${}^i_0\mathbf{A} = {}^1_0\mathbf{A}^2_1\mathbf{A} \dots {}^{i-1}_{i-2}\mathbf{A}^i_{i-1}\mathbf{A} \quad (2-3)$$

Essa matriz fornece a posição e a orientação do efetuador terminal em relação ao sistema da base em função das posições de todas as juntas. Assim sendo, ela pode ser reescrita da seguinte forma:

$${}^i_0\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^i_0\mathbf{R} & {}^i_0\mathbf{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Em que ${}^i_0\mathbf{R}$ diz respeito matriz que fornece a orientação do efetuador em relação ao sistema da base, enquanto que ${}^i_0\mathbf{x}$ é o vetor que representa a posição do órgão terminal em relação ao sistema da base.

2.7 VELOCIDADES DO EFETUADOR TERMINAL

Para se encontrar (Cabral, 2017) a velocidade linear do efetuador basta derivar no tempo as componentes x, y e z do vetor ${}^i_0\mathbf{x}$ da Eq. (2-4), que é função de todas as posições das juntas, assim:

$$\mathbf{v}_n = \frac{d{}^i_0\mathbf{x}}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{d{}^i_0x}{dt} \\ \frac{d{}^i_0y}{dt} \\ \frac{d{}^i_0z}{dt} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Por conta da dependência das variáveis de juntas, faz-se necessário utilizar a regra da cadeia para cada componente do vetor de velocidade linear. Com isso, define-se a matriz jacobiano de velocidade linear $3 \times n$ $\mathbf{J}_v(\mathbf{q})$:

$$\mathbf{J}_v(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial {}^i_0x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial {}^i_0x}{\partial q_i} \\ \frac{\partial {}^i_0y}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial {}^i_0y}{\partial q_i} \\ \frac{\partial {}^i_0z}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial {}^i_0z}{\partial q_i} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Assim, a velocidade linear pode ser reescrita utilizando as eq. (2-5) e (2-6):

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{J}_v(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2-7)$$

Já a velocidade angular de um determinado elo i em relação ao sistema de coordenadas da base é dada por:

$$\mathbf{w}_i = \rho_1\dot{q}_1\mathbf{z}_0 + \rho_2\dot{q}_2\mathbf{z}_1 + \dots + \rho_i\dot{q}_i\mathbf{z}_{i-1} \quad (2-8)$$

Em que:

$$\rho_i = \begin{cases} 1, & \text{se a junta } i \text{ for de revolução} \\ 0, & \text{se a junta } i \text{ for de translação} \end{cases}$$

Da mesma forma que para velocidade linear, tem-se o jacobiano de velocidade angular $3 \times n$ $J_w(\mathbf{q})$:

$$J_w = [\rho_1 \mathbf{z}_0, \rho_2 \mathbf{z}_1, \dots, \rho_i \mathbf{z}_{i-1}] \quad (2-9)$$

Reescrevendo a eq. (2-8) com (2-9):

$$\mathbf{w}_i = J_w(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2-10)$$

Por fim, define-se a matriz jacobiano de um manipulador que é dada pela união entre (2-7) e (2-10):

$$J(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} J_v(\mathbf{q}) \\ J_w(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

Assim,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{w}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_v(\mathbf{q}) \\ J_w(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = J(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2-12)$$

2.8 MOVIMENTO DOS ELOS DE UM MANIPULADOR

Para o estudo da dinâmica dos manipuladores é fundamental adotar uma nomenclatura consistente e que não gere dúvidas, para tanto, optou-se por utilizar a notação empregada por (Craig, 2012) em toda a análise dinâmica do robô.

O sobrescrito à esquerda e o subscrito à direita de uma grandeza qualquer se referem, respectivamente, ao sistema de coordenadas ao qual faz referência e ao elemento a que se refere, por exemplo, ${}^B V_Q$ significa a velocidade de Q em relação ao sistema de coordenadas B. Para evitar o uso exaustivo da palavra sistema de coordenadas, utiliza-se chaves, por exemplo, sistema de coordenadas {B} pode ser facilmente entendido apenas por {B}. Quando se trata de uma rotação, tem-se que ${}^A_B R$ é a matriz rotacional de {B} em relação a {A}.

Para realizar a dinâmica dos manipuladores, ou seja, conhecer as forças e momentos atuantes em cada junta, é preciso conhecer as velocidades, acelerações e momentos de inércia destas (Craig, 2012).

2.8.1 “PROPAGAÇÃO” DE VELOCIDADE ENTRE ELOS

No estudo dos movimentos de um robô, usa-se o sistema de coordenadas do elo {0} como sendo o sistema de referência. Assim, v_i e ω_i correspondem à velocidade linear e angular, respectivamente, da origem do sistema de coordenadas do elo {i}.

Um manipulador, por se tratar de uma cadeia de corpos rígidos, possibilita que o cômputo das velocidades de cada elo seja feito de maneira sequencial, começando pela base. Assim, a velocidade do elo $i+1$ é igual a do elo i mais os novos componentes de velocidade da junta $i+1$. A Figura (30) ilustra os elos i e $i+1$, bem como seus respectivos vetores velocidades nos sistemas de coordenadas dos elos:

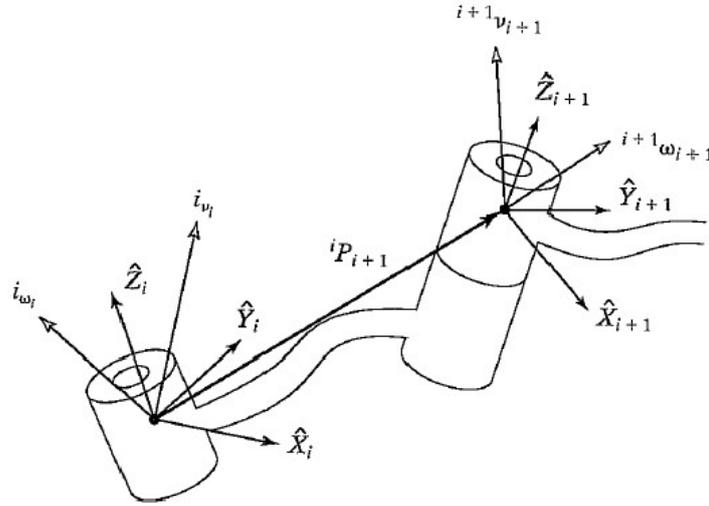


Figura 30 - Vetores velocidades de elos vizinhos (Craig, 2012).

A velocidade angular do elo $i+1$ é igual à do elo i somada de uma componente advinda do movimento rotacional da junta $i+1$. Em relação a $\{i\}$, tem-se:

$${}^i\omega_{i+1} = {}^i\omega_i + {}_{i+1}{}^iR \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2-13)$$

Em que:

$$\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

O uso da matriz rotacional entre $\{i\}$ e $\{i+1\}$ tem por objetivo representar o componente rotacional advindo do movimento da junta em $\{i\}$. Assim o eixo de rotação da junta $i+1$ é girado até sua descrição em $\{i\}$, o que possibilita que os dois componentes da velocidade angular sejam somados. Multiplicando à esquerda os dois lados de (2-13) por ${}^{i+1}{}^iR$, obtém-se a descrição da velocidade angular do elo $i+1$ em relação a $\{i+1\}$:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2-15)$$

A velocidade linear da origem de $\{i+1\}$ é igual de $\{i\}$ mais um componente causado pela velocidade rotacional do elo i :

$${}^i v_{i+1} = {}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1} \quad (2-16)$$

Multiplicando à esquerda os dois lados de (2-16) por ${}^{i+1}{}^iR$

$${}^{i+1} v_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) \quad (2-17)$$

No caso de juntas prismáticas, as relações (2-15) e (2-17) se reduziram a:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R \ {}^i\omega_i \quad (2-18)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2-19)$$

2.8.2 ACELERAÇÃO LINEAR DE CORPOS RÍGIDOS

Seja a velocidade de um vetor ${}^B Q$ visto no sistema de coordenadas $\{A\}$ quando as origens são coincidentes:

$${}^A V_Q = {}^A_B R \ {}^B V_Q + {}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B Q \quad (2-20)$$

Reescrevendo a eq. (2-20), tem-se que:

$$\frac{d}{dt} ({}^A_B R \ {}^B Q) = {}^A_B R \ {}^B V_Q + {}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B Q \quad (2-21)$$

Diferenciando no tempo a eq. (2-20), tem-se que:

$${}^A \dot{V}_Q = \frac{d}{dt} ({}^A_B R \ {}^B V_Q) + {}^A \dot{\Omega}_B \times {}^A_B R \ {}^B Q + {}^A\Omega_B \times \frac{d}{dt} ({}^A_B R \ {}^B Q) \quad (2-22)$$

Substituindo (2-21) em (2-22) e já agrupando os termos, tem-se que:

$${}^A \dot{V}_Q = {}^A_B R \ {}^B \dot{V}_Q + 2 {}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B V_Q + {}^A \dot{\Omega}_B \times {}^A_B R \ {}^B Q + {}^A\Omega_B \times ({}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B Q) \quad (2-23)$$

No caso em que $\{A\}$ e $\{B\}$ não tenham origens coincidentes, adiciona-se o termo que dá a aceleração linear da origem de $\{B\}$:

$${}^A \dot{V}_Q = {}^A \dot{V}_{BORG} + {}^A_B R \ {}^B \dot{V}_Q + 2 {}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B V_Q + {}^A \dot{\Omega}_B \times {}^A_B R \ {}^B Q + {}^A\Omega_B \times ({}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B Q) \quad (2-24)$$

O cálculo da aceleração linear dos elos de um manipulador com juntas rotacionais é um caso particular da eq. (2-24) para ${}^B Q$ constante, assim:

$${}^A \dot{V}_Q = {}^A \dot{V}_{BORG} + {}^A \dot{\Omega}_B \times {}^A_B R \ {}^B Q + {}^A\Omega_B \times ({}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B Q) \quad (2-25)$$

2.8.3 ACELERAÇÃO ANGULAR DE CORPOS RÍGIDOS

Num caso em que $\{B\}$ esteja girando em relação a $\{A\}$ com ${}^A\Omega_B$ e $\{C\}$ esteja girando em relação a $\{B\}$ com ${}^B\Omega_C$, para se conhecer ${}^A\Omega_C$, faz-se as somas dos vetores no sistema $\{A\}$ como referência:

$${}^A\Omega_C = {}^A\Omega_B + {}^A_B R \ {}^B\Omega_C \quad (2-26)$$

Diferenciando no tempo e utilizando a Eq. (2-21), tem-se a equação a ser utilizada para o cálculo da aceleração dos elos de um manipulador:

$${}^A \dot{\Omega}_C = {}^A \dot{\Omega}_B + {}^A_B R \ {}^B \dot{\Omega}_C + {}^A\Omega_B \times {}^A_B R \ {}^B\Omega_C \quad (2-27)$$

2.8.4 DISTRIBUIÇÃO DE MASSA

Diferentemente de um sistema com um único grau de liberdade, no qual o conceito de momento de inércia é bem conhecido, no caso de um corpo rígido que pode se mover em três dimensões esse conceito se torna mais complicado. Isto se deve ao fato de neste caso existirem infinitos eixos de rotação possíveis. Para realizar a caracterização da distribuição de massa neste caso, lança-se mão de um tensor de inércia. Este tensor pode ser definido em relação a qualquer sistema de referência que se deseje, mas, no presente contexto, considera-se sempre o caso deste tensor estar definido para um sistema de referência que se encontra fixado no corpo. Assim, caracteriza-se o tensor de inércia em relação a $\{A\}$ como sendo:

$${}^A I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

No qual cada elemento da matriz é dado por:

$$I_{xx} = \iiint_V (y^2 + z^2)\rho dv \quad (2-29)$$

$$I_{yy} = \iiint_V (x^2 + z^2)\rho dv \quad (2-30)$$

$$I_{zz} = \iiint_V (y^2 + x^2)\rho dv \quad (2-31)$$

$$I_{xy} = \iiint_V xy\rho dv \quad (2-32)$$

$$I_{xz} = \iiint_V xz\rho dv \quad (2-33)$$

$$I_{yz} = \iiint_V yz\rho dv \quad (2-34)$$

Ou seja, o tensor de inércia de um objeto qualquer tem por função descrever qual é a distribuição de massa deste. Em que dv é um elemento diferencial de volume.

Pode-se fazer necessário, ainda, a utilização do Teorema dos eixos paralelos (Shames, 1967, apud Craig, 2012, p.162).

2.9 DINÂMICA DOS MANIPULADORES

2.9.1 EQUAÇÃO DE NEWTON E EULER

Cada elo de um manipulador é um corpo rígido, assim, conhecendo a posição do centro de massa e o tensor de inércia se tem tudo sobre sua distribuição de massa. Esta informação juntamente com a aceleração desejada caracteriza a equação da força necessária para acelerar ou desacelerar o elo, que é a Equação de Newton:

$$F = m\dot{v}_C \quad (2-35)$$

Em que F é a força atuante no centro de massa, m a massa total do corpo e \dot{v}_C a aceleração.

A Equação de Euler é análoga à Equação de Newton, sendo dada por:

$$N = {}^C I \dot{\omega} + \omega \times {}^C I \omega \quad (2-36)$$

Em que ω é a velocidade angular, $\dot{\omega}$ é a aceleração angular, N é o momento aplicado e ${}^C I$ é o tensor de inércia em {C}, cuja origem está posicionado no centro de massa.

Vale destacar ainda, dois resultados de extrema importância para a dinâmica dos manipuladores: a aceleração angular de um elo para o outro e a aceleração linear de um elo para o outro.

Da Eq. (2-27), tem-se a aceleração angular de um elo para o outro, dada por:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \dot{\omega}_i + {}^{i+1}_i R \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2-37)$$

No caso da junta ser prismática, tem-se:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \dot{\omega}_i \quad (2-38)$$

Da Eq. (2-25), tem-se a aceleração linear de um elo para o outro:

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_i R [\dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{v}_i] \quad (2-39)$$

No caso da junta ser prismática, tem-se:

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_i R [\dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{v}_i] + 2 {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times d_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2-40)$$

Da Eq. (2-25) ainda se extrai a aceleração linear do centro de massa de cada elo:

$${}^i \dot{v}_{C_i} = \dot{\omega}_i \times {}^i P_{C_i} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i P_{C_i}) + \dot{v}_i \quad (2-41)$$

A Eq. (2-41) é obtida, considerando-se um sistema de referência $\{C_i\}$, fixado a cada elo com a sua origem no centro de massa e com orientação igual a de $\{i\}$. Como esta equação não envolve movimentos de juntas de qualquer tipo ela é válida também para a junta $i+1$, independentemente de ser prismática ou rotacional.

2.9.2 FORÇA E TORQUE AGINDO SOBRE AS JUNTAS

Com as forças e torques calculados para cada elo, faz-se necessário calcular as forças e torques nas juntas que combinados geram os valores calculados para os elos. Para isso, lança-se mão das equações de equilíbrio de forças e momentos. A Figura (31) ilustra o diagrama de corpo livre de um elo genérico:

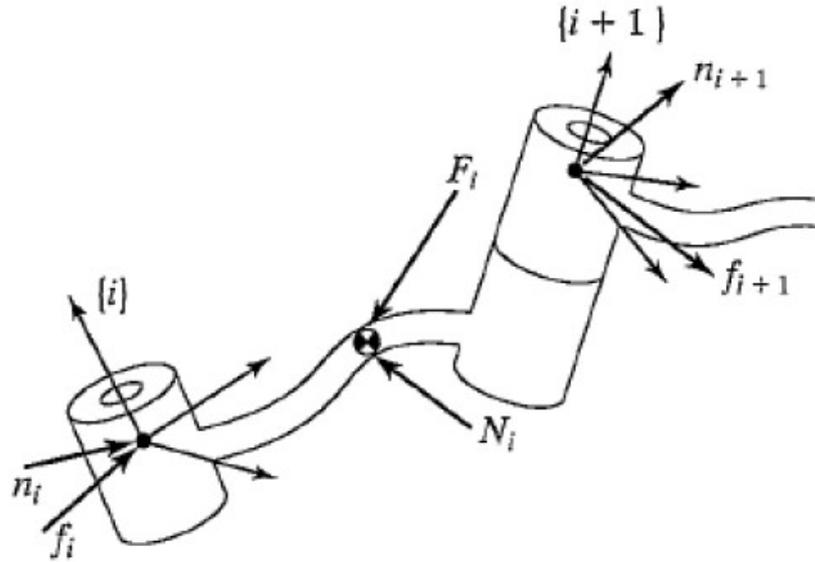


Figura 31 - Diagrama de corpo livre de um elo genérico para o equilíbrio de forças e momentos (Craig, 2012).

Em que:

f_i é a força exercida sobre o elo i pelo elo $i-1$; e,

n_i é o torque exercido sobre o elo i pelo elo $i-1$.

Assim, pelo equilíbrio de forças sobre o elo i , tem-se:

$${}^iF_i = {}^i f_i - {}_{i+1}R^{i+1} f_{i+1} \quad (2-42)$$

Pelo equilíbrio de momentos sobre o elo i em relação ao centro de massa, tem-se:

$${}^iN_i = {}^i n_i - {}^i n_{i+1} + (- {}^iP_{C_i}) \times {}^i f_i - ({}^iP_{i+1} - {}^iP_{C_i}) \times {}^i f_{i+1} \quad (2-43)$$

Substituindo a Eq. (2-42) em (2-43), utilizando matrizes rotacionais e rearranjando os termos para que se tenha uma relação iterativa da junta vizinha de número mais alto para o de número mais baixo, tem-se para a equação de força e torque, respectivamente:

$${}^i f_i = {}_{i+1}R^{i+1} f_{i+1} + {}^iF_i \quad (2-44)$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}_{i+1}R^{i+1} n_{i+1} + {}^iP_{C_i} \times {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \times {}_{i+1}R^{i+1} f_{i+1} \quad (2-45)$$

Todos as componentes da força e momento sofrem resistência da estrutura do mecanismo. O único que não é resistido é o torque em torno do eixo das juntas. Para encontrá-lo, realiza-se o produto escalar de \hat{Z} com o vetor do momento que age sobre o elo:

$$\tau_i = {}^i n_i^T \cdot {}^i \hat{Z}_i \quad (2-46)$$

No caso das juntas prismáticas:

$$\tau_i = {}^i f_i^T \cdot {}^i \hat{Z}_i \quad (2-47)$$

Por fim, vale destacar que para se encontrarem as forças estáticas atuantes no manipulador, basta zerar os termos F_i , N_i e P_{C_i} nas equações acima.

2.10 DEFLEXÕES EM VIGAS

Um aspecto relevante no projeto de manipuladores (Craig, 2012) está relacionado a rigidez e deflexão da estrutura, principalmente dos elos, os quais não podem ceder por conta de cargas atuantes sobre eles ou pela própria gravidade. Se esta condição de rigidez não é respeitada, a análise cinemática e dinâmica será afetada, pois a modelagem não estará descrevendo de maneira correta e precisa as posições dos componentes do robô.

Um conceito importante no projeto contra deflexão é o da linha elástica, que diz respeito a deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centroide de cada área da seção transversal da viga (Hibbeler, 2010). A forma da linha elástica está relacionada a posição das forças, momentos, apoios e também dos tipos de apoios.

Considerando que o material é homogêneo e se comporta de forma linear de acordo com a Lei de Hooke, tem-se a Eq. (2-48) que descreve a relação entre o momento fletor e a deflexão (Hibbeler, 2010):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2-48)$$

Em que ρ é o raio de curvatura em um ponto específico sobre a curva da linha elástica, M é o momento fletor interno atuante na viga no ponto em que ρ está sendo determinado, E é o módulo de elasticidade do material e, por fim, I é o momento de inércia calculado em torno do eixo neutro da viga. Vale destacar, ainda, que o termo EI é denominado rigidez à flexão e é um termo sempre positivo.

Utilizando conceitos do cálculo e de equações diferenciais, chega-se a Eq. (2-49) que é a forma diferencial da equação da linha elástica:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2-49)$$

Para resolver a Eq. (2-49), lança-se mão do uso de integrações sucessivas com as condições de contorno adequadas. Contudo, na prática usual de engenharia no projeto dos elos de manipuladores (Craig, 2012), usa-se a aproximação para o caso de o elo ser uma viga em balanço, calculando sua rigidez no ponto extremo, conforme a Fig. (32):

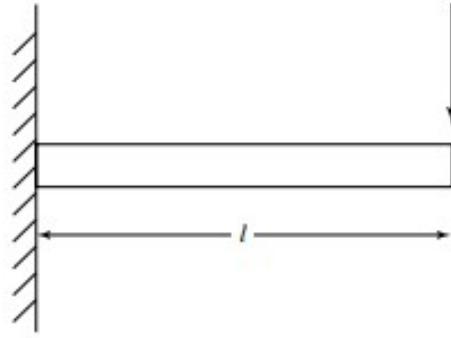


Figura 32 - Viga em balanço usada como modelo de rigidez de um elo em relação a uma carga final (Craig, 2012).

Dois casos se apresentam como sendo interessantes de serem analisados no projeto de um elo, o caso em que o elo é um tubo circular oco e, também, o caso em que o corte transversal tem perfil quadrado com espessura de parede. Assim, as Eqs. (2-50) e (2-51) apresentam, respectivamente, o cálculo da rigidez para uma viga circular oca e para uma viga quadrada (Craig, 2012):

$$k = \frac{3\pi E(d_e^4 - d_i^4)}{64l^3} \quad (2-50)$$

Em que d_i, d_e, E, l são respectivamente o diâmetro interno do tubo, o diâmetro externo, módulo de elasticidade e o comprimento da viga.

$$k = \frac{E(w_e^4 - w_i^4)}{4l^3} \quad (2-51)$$

Em que w_i, w_e, E, l são respectivamente a largura interna da viga, a largura externa, módulo de elasticidade e o comprimento da viga, ou seja, a espessura da parede é $w_e - w_i$.

Vale ainda destacar, por fim, que as fórmulas apresentadas para cálculo da rigidez são para casos simples para dar uma noção e orientação no processo de dimensionar os elos do robô. Contudo, por vezes, a abordagem analítica não será suficiente (Craig, 2012) tendo em vista a complexidade na modelagem dos elos e nas fontes de flexibilidade, como por exemplo, os rolamentos, suporte do atuador, entre outros. Assim, é conveniente utilizar o método dos elementos finitos para obter a rigidez, e outros parâmetros de projeto, de forma mais precisa.

3 PROJETO CONCEITUAL

3.1 ESPECIFICAÇÕES DE TAREFAS

O objetivo do presente projeto é de realizar e viabilizar uma solução que atenda às necessidades dos potenciais usuários das WMRA de segurança e efetividade, com um enfoque na redução do custo para tal. Para isso é de fundamental importância analisar os requisitos e características que o robô a ser desenvolvido possuirá. Esta etapa consiste na decisão e definição de quais são as tarefas específicas principais que o manipulador irá realizar, limitando o escopo do problema.

O número de tarefas e a qualidade com a qual o robô consegue realizá-las está diretamente relacionado com diversas decisões de projeto, como por exemplo, tamanho total do robô, número de juntas, disposição dos atuadores, disposição do sistema de controle, sistema de transmissão, disposição na cadeira de rodas, número de graus de liberdade no punho, formato da garra, entre outros. No geral, quanto maior a complexidade de tarefas que o manipulador consegue executar, mais complexo se torna seu projeto, não só do ponto de vista mecânico, eletrônico e computacional, mas também do ponto de vista econômico, associado aos seus custos.

Assim sendo, objetiva-se que a WMRA desenvolvida possa ajudar potenciais usuários em tarefas relacionadas a se alimentar, se hidratar, trabalhar, lazer e mobilidade, ou seja, o foco será em tornar o robô capaz de alcançar, pegar, posicionar e carregar objetos presentes no dia-a-dia, como por exemplo, copos e alimentos. Além disso, objetiva-se que o manipulador seja capaz de abrir e fechar portas para garantir maior mobilidade e independência ao usuário. De acordo com essas atividades, evidencia-se que a capacidade de carga não precisará ser acentuada. Além disso, outros aspectos relevantes para aplicação é o objetivo de a massa total do manipulador ser baixa e deste poder ser compactado quando não estiver em uso, ou seja, dobrar sobre si. Por fim, destaca-se a questão da alimentação do manipulador que será dada pela bateria da cadeira de rodas, na qual será montado. Assim, atenção especial deverá ser dada para que todos os atuadores, controladores e demais elementos sejam compatíveis com a tensão entregue pela bateria.

A fim de entender as particularidades dos aspectos construtivos das WMRA será feito um resumo das WMRA comerciais existentes e também daquelas que vêm sendo desenvolvidas ao longo dos últimos anos no ambiente acadêmico. A Tabela (1) resume tais informações.

Tabela 1 – Aspectos construtivos das WMRA's existentes.

| | JACO | Manus Arm (iARM) | Weston Wheelchair | Raptor Arm | DORA | KARES | Mats | USF | RAPUDA |
|--|---|------------------------------------|--|--------------------------|--|--|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| Fabricante | <i>Kinova Technology</i> | <i>Exact Dynamics</i> | <i>Bath Institute of Medical Engineering</i> | <i>Applied Resources</i> | <i>University of Massachussets, Lowell</i> | <i>KAIST Rehabilitation Engineering System</i> | <i>University of Carlos III</i> | <i>University of South Florida</i> | <i>AIST's Intelligent Systems Research Institute</i> |
| Configuração | Articulado | Articulado | SCARA | Articulado | Esférico | Articulado | Articulado | Articulado | Esférico |
| Massa | 5 kg | 9 kg | - | - | - | 22,9 kg | 11 kg | 12,5 kg | 6 kg |
| Capacidade de Carga (<i>Payload</i>) | 1,5 kg (alcance de até 45 cm) 1,0 kg (alcance entre 45 cm a 90 cm) | 1,5 kg | - | - | - | 500 g | - | 6 kg | 500 g |
| Alcance | 90 cm | 90 cm + 20 cm (adicional opcional) | 1,2 m | - | - | 82 cm | 1,3 m | 1,37 m | 100 cm |
| Graus de Liberdade | 6 | 7 | 5 | 4 | 7 | 6 | 5 | 7 | 6 |
| Garra | 3 dedos | 2 dedos | 2 dedos | 2 dedos | 3 dedos | 3 dedos | 3 dedos | - | 2 dedos |
| Atuadores | motor cc sem escova | servo motores na base | - | - | - | motores de passo | - | servo motores nas juntas | - |
| Velocidade Máxima | 15 cm/s | 15 cm/s | - | - | - | - | - | - | - |
| Material | Fibra de Carbono | - | - | - | - | Alumínio | Liga de Alumínio e Fibra de Carbono | Alumínio | Plástico |
| Preço | R\$140.000,00 | R\$72.000,00 | - | R\$36.000,00 | - | - | - | R\$93.000,00 | - |

Ao se fazer uma análise da Tab. (1), nota-se que a configuração mais comum para as WMRAs é a Articulada, uma vez que esta garante uma maior versatilidade de movimentação para o robô. Além disso, nota-se que a massa do braço varia desde 5 kg até 22,9 kg, isto se deve ao material utilizado e disposição dos atuadores, por exemplo. De forma semelhante, tem-se a capacidade de carga das WMRAs analisadas que variam de 500 g até 6 kg. No que tange aos graus de liberdade, nota-se que quanto maior o número deles, maior será a diversidade e complexidade de tarefas que o manipulador conseguirá realizar, contudo, o custo envolvido também aumenta com o aumento dos GLs. Por fim, vale destacar a questão dos atuadores que devem ser selecionados de maneira a garantir a maior capacidade de carga possível, mas sem acrescentar, de forma acentuada, na massa total do sistema.

3.2 SÍNTESE E CONCEPÇÃO

Nesta etapa, tem-se por objetivo expor e confrontar múltiplas alternativas de solução para o problema, sem avaliar com muita minúcia e profundidade pormenores técnicos relativos a cada uma das soluções propostas.

Para conceber soluções diferentes para o problema é fundamental que este seja dividido em subproblemas menores, a fim de entendê-los, analisá-los e compreendê-los, bem como suas relações, pois assim é possível chegar em alternativas mais estruturadas. Para tal, utilizou-se a Matriz Morfológica (Zavadil, et al., 2014), uma ferramenta para design de produtos, que facilita o estudo sistemático de um grande número de combinações possíveis entre vários componentes ou elementos de um determinado sistema ou produto.

A aplicação da Matriz Morfológica se dá por meio de uma tabela na qual a primeira coluna vertical lista características gerais, ou seja, partes e funções, que são primordiais para o problema em questão. Já as linhas horizontais contêm as alternativas de solução para cada uma dessas características. Recomenda-se (Zavadil, et al., 2014) que sejam listadas entre 4 a 7 soluções para cada parte, pois assim é possível gerar um número satisfatório de combinações entre as diversas funções do produto. A Figura (33) apresenta a Matriz Morfológica construída para o presente projeto.

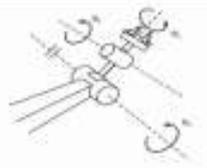
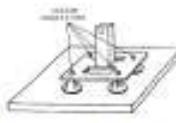
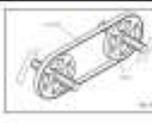
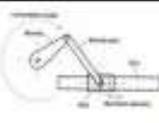
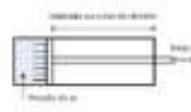
| | | | | | | |
|-------------------------------|---|--|---|---|--|---|
| Material |  Aço |  Alumínio |  PVC |  Plástico PLA/ABS |  Fibra de Carbono |  Nylon (TechNyl) |
| Configuração |  SCARA |  Articulado |  Esférico |  Cilindrico | | |
| Punho |  2 juntas rotativas |  3 juntas rotativas (punho esférico) |  3 juntas rotativas com eixos que não se cruzam em um mesmo ponto | | | |
| Efetuator terminal |  Garra de 2 dedos |  Garra de 3 dedos |  Ferramenta |  Garra a vácuo | | |
| Transmissão |  Engrenagens |  Correias |  Correntes |  TEPs |  Hastes Rígidas |  Cabos |
| Acionamento das Juntas |  Motor CC |  Servo motores |  Motores de Passo |  Hidráulico |  Pneumático | |
| Controle |  Arduino |  Peripheral Interface Controller (PIC) |  Controlador Lógico Programável (CLP) |  Rasperry | | |

Figura 33 - Matriz Morfológica para o Manipulador Robótico.

3.3 ANÁLISE

Antes de gerar as soluções com a Matriz Morfológica, realizou-se uma análise comparativa, a fim de evidenciar as principais vantagens e desvantagens, das possibilidades de cada parte e função: material, configuração, punho, efetuator terminal, transmissão, acionamento das juntas e controle.

O material é de fundamental importância para a estrutura do robô, assim, para se compararem as possibilidades levantadas na Fig. (33) serão levados em consideração a massa específica, a rigidez, o custo e a disponibilidade do material. A massa específica está intimamente relacionada ao peso do robô, portanto deve ser tão menor quanto possível para que não seja necessário a seleção de atuadores mais robustos, caros e, ainda, que a funcionalidade do robô não seja comprometida. Já a rigidez afeta o projeto contra deflexão dos elos, no qual se busca minimizá-la para que o manipulador tenha uma boa exatidão e repetibilidade. O custo do material é um fator limitante crítico, tendo em vista que o objetivo do projeto é realizar uma solução barata dentro do ambiente universitário, mas ainda assim efetiva. Por fim, a disponibilidade está relacionada ao nível de dificuldade de se encontrar o material em questão com fornecedores locais e também ao grau de facilidade em se manusear o material nos processos de fabricação com as ferramentas disponíveis. A Tabela (2) reúne as propriedades mecânicas médias para o aço, alumínio, PVC, fibra de carbono, plástico PLA, plástico ABS e Nylon (TechNyl):

Tabela 2 – Propriedades médias (MATWEB, 2018).

| Material | Massa específica ρ (kg/m ³) | Módulo de Young E (GPa) |
|--------------------|---|----------------------------|
| Aço | 7800-7900 | 200 |
| Alumínio | 2698 | 68 |
| PVC | 1380 | 2,84 |
| Fibra de carbono | 1430 | 103 |
| Plástico PLA | 1290 | 2,79 |
| Plástico ABS | 1050 | 2,07 |
| Nylon (TechNyl) | 1370 | 9,80 |

A partir da análise da Tab. (2) e das considerações sobre custo e disponibilidade dos materiais, realizou-se uma Matriz de Decisão, que compara os aspectos mencionados dos materiais em questão. Esta matriz ajuda a identificar a melhor solução na medida em que faz com que o projetista considere uma variedade de fatores de forma sistemática para tomar sua decisão (Henriques, 2018). Esta etapa tem por objetivo comparar de forma pragmática as vantagens e desvantagens de cada um dos materiais propostos. A Tabela (3) apresenta a Matriz de Decisão construída com os pesos já explicitados, bem como as notas atribuídas a cada uma das alternativas. As notas conferidas a cada um dos critérios em cada uma das alternativas variaram de 1 a 5, onde 1 é o pior cenário para dado critério e 5 é a melhor condição:

Tabela 3 – Matriz de Decisão: Material

| Material | Massa específica ρ (kg/m ³) | Módulo de Young E (GPa) | Custo | Disponibilidade | Total |
|--------------------|---|----------------------------|-------|-----------------|-------|
| Pesos | 2 | 2 | 4 | 3 | - |
| Aço | 1 | 5 | 3 | 4 | 36 |
| Alumínio | 3 | 3 | 3 | 4 | 36 |
| PVC | 5 | 1 | 5 | 4 | 44 |
| Fibra de carbono | 5 | 4 | 1 | 1 | 25 |
| Plástico PLA | 5 | 1 | 3 | 5 | 39 |
| Plástico ABS | 5 | 1 | 3 | 5 | 39 |
| Nylon (TechNyl) | 5 | 2 | 3 | 4 | 38 |

Considerou-se o custo como sendo o fator de maior peso, pois é ele que inviabiliza ou não a execução do projeto. Seguindo dele considerou como sendo o segundo fator mais crítico a disponibilidade, pois como o intuito é de se fabricar um protótipo, caso não haja disponibilidade o objetivo não é atingido também. Por fim, atribuíram-se os mesmos pesos para a massa específica e rigidez, pois apesar de sua grande relevância para o projeto, comparativamente, apresentam uma criticidade menor. Já as notas foram dadas para cada material em cada critério a partir de aspectos quantitativos e qualitativos, embasados pela Tab. (2), por preços médios de tubos dos materiais expostos e por consulta a fabricantes e fornecedores locais. Um aspecto importante de ser mencionado é que a matriz de decisão para o material não exclui nem substitui a análise estrutural para a seleção correta do mesmo.

Para as demais partes e funções da Matriz Morfológica, seguiu-se uma análise análoga a feita para o material.

A configuração cinemática do manipulador define a configuração que as juntas terão a partir do número de graus de liberdade do robô. Com base na Tab. (1), nota-se que para as WMRA o número de graus de liberdade varia de 4 a 7, sendo que a maior parte deles possui 6, o qual será o adotado no presente projeto. Vale lembrar que são necessários 3 GLs para se definir a posição no espaço 3D e 3 GLs para se definir todas as orientações possíveis do efetuador terminal. Além disso, ainda na Tab. (1), nota-se que as WMRA analisadas assumem a configuração SCARA, Esférica e Articulada, mas a mais recorrente é a Articulada. Isto se deve, em grande medida, ao fato de que esta configuração minimiza a intrusão da estrutura do manipulador no espaço de trabalho deste, garantindo uma versatilidade maior de movimentação, posicionamento e orientação em relação as demais configurações. Vale destacar que o fato da intrusão, para uma configuração articulada, ser minimizada é de especial importância no contexto de braços robóticos montados sobre cadeiras de rodas, devido a presença do usuário de maneira muito próxima ao manipulador. A Tabela (4) apresenta a matriz de decisão para as configurações possíveis, que pondera sob os critérios: espaço de trabalho manipulável, repetibilidade/precisão, segurança ao usuário e estética, considerando para todas as configurações dimensões equivalentes e o mesmo material utilizado:

Tabela 4 – Matriz de Decisão: Configuração

| Configuração | Espaço de trabalho manipulável | Repetibilidade/Precisão | Segurança ao Usuário e Estética | Total |
|--------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------|
| Pesos | 4 | 1 | 4 | - |
| Articulada | 5 | 3 | 5 | 43 |
| Cilíndrica | 3 | 5 | 3 | 29 |
| Esférica | 4 | 3 | 5 | 39 |
| SCARA | 3 | 5 | 3 | 29 |

Considerou-se o espaço de trabalho, segurança ao usuário e a estética como sendo os critérios mais relevantes na ponderação tendo em vista o objetivo de garantir autonomia e independência de maneira efetiva aos usuários da WMRA em questão. No que tange a repetibilidade e precisão, deu-se o menor peso, pois as atividades que serão realizadas são atividades de agarrar, mover e posicionar, sem muito refinamento, objetos do dia-a-dia, o que não exige uma alta repetibilidade e precisão e, ainda, porque esse ajuste fino aumenta consideravelmente os custos do projeto. Já as notas foram dadas para cada configuração em cada critério a partir de aspectos qualitativos, embasados pelas análises de soluções existentes na revisão bibliográfica e pela literatura.

O punho é a parte do manipulador que confere as possibilidades de orientação do efetuador terminal. De modo geral ele pode conter 2 ou 3 juntas rotativas, com eixos que se cruzam ou não em um mesmo ponto. Os movimentos do punho são denominados de *Yaw*, *Pitch* e *Roll* (Carrara, 2015). No caso de 3

juntas todos estes movimentos estão presentes, já no caso de 2 juntas, de modo geral, somente os movimentos de *Roll* e *Pitch* se fazem presentes. A Figura (34) ilustra tais movimentos:

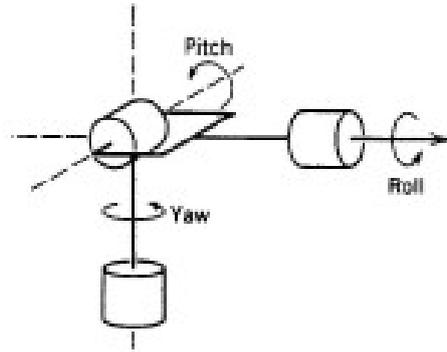


Figura 34 - Movimentos de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* em um punho esférico (Carrara, 2015).

Como o objetivo do projeto é de conferir um robô que consiga posicionar e orientar seu efetuator de maneira completa no espaço 3D, descarta-se a opção do punho com 2 juntas rotativas. Idealmente, objetiva-se que os punhos tenham eixos de rotação mutuamente perpendiculares, pois assim a solução cinemática será de forma fechada, ou seja, tem-se uma solução analítica. Contudo, na prática, é complicado de montá-lo. No entanto, existe a possibilidade de se montar um punho, com eixos que não se cruzam, a um braço articulado e haver sim uma solução fechada, com a condição de que o eixo da junta 4 fique paralelo ao eixo das juntas 2 e 3 (Craig, 2012), conforme ilustra a Fig. (35):

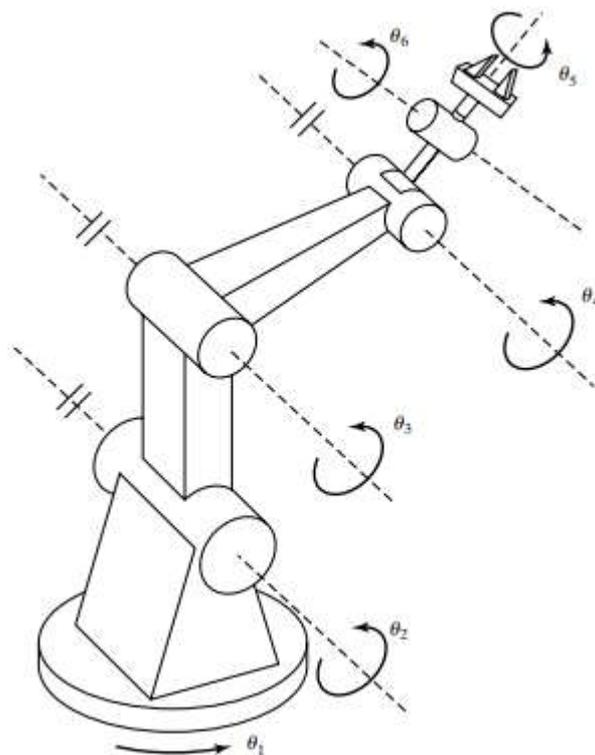


Figura 35 - Manipulador articulado com punho com eixos que não se cruzam (Craig, 2012).

O efetuator terminal é o termo genérico para o componente montado no final do braço robótico, sendo que seu projeto corresponde a um ramo específico da robótica (Santos, 2015). Assim, no presente projeto não se tem por objetivo fazer uma análise detalhada do efetuator, portanto, optou-se por utilizar

de maneira direta a solução mais simples disponível que é a Garra de 2 dedos, apesar de sua limitação de abertura para manusear objetos maiores que sua abertura total.

Para o projeto do esquema de acionamento e das transmissões mecânicas é importante que já se tenha definido a estrutura geral do manipulador. O primeiro passo é discutir a localização que os atuadores terão no braço robótico para entender quais, e se, serão necessários sistemas de transmissão na aplicação. De forma geral, tem-se duas alternativas construtivas para transmitir força ou torque para as juntas do robô: o acionamento direto e o indireto. O primeiro diz respeito ao posicionamento do atuador na própria junta ou em sua proximidade imediata, já o segundo diz respeito aos atuadores que se encontram longe das juntas que são responsáveis por acionar, realizando a transmissão de torque e força por meio de um sistema de transmissão do movimento.

O esquema de acionamento direto (Craig, 2012) é recomendado para os casos em que o atuador possa produzir a força ou torque suficiente à junta para seu correto funcionamento. Este tipo de configuração apresenta as seguintes vantagens:

- Simplicidade no projeto;
- Manipulador mais compacto como um todo;
- Maior capacidade de controle da junta; e,
- Ausência de elementos de transmissão ou redução entre a junta e o elo (redução de folgas e atritos).

Por outro lado, também, o acionamento direto apresenta como desvantagens os seguintes aspectos:

- Aumento da inércia geral do manipulador, por conta do acréscimo de massa nas juntas;
- Torques baixos que podem não suprir o necessário para a execução da tarefa pelo robô; e,
- Velocidades acima do necessário para o braço.

Já o acionamento indireto é empregado em situações em que os atuadores operem de maneira mais adequada a altas velocidades e baixos torques, sendo necessário, assim, um sistema de transmissão ou redução. Este esquema também tem, de maneira análoga ao caso direto, suas principais vantagens destacadas abaixo:

- Inércia geral do manipulador mais reduzida, quando afastados da junta que acionam; e,
- Possibilidade de alocar a maior parte dos atuadores próximo à base.

Enquanto que as principais desvantagens são elencadas a seguir:

- Complexidade do projeto devido ao aumento dos componentes mecânicos; e,

- Sistemas de transmissão acrescentam atrito e flexibilidades aos mecanismos prejudicando precisão e rendimento.

Como no contexto das WMRAs a capacidade de carga necessária não apresenta um alto valor, a solução de acionamento direto apresenta vantagens que se mostram mais atrativas que suas desvantagens se comparadas com as do acionamento indireto.

Mais do que a localização dos atuadores e de um eventual sistema de transmissão, é de fundamental importância analisar quais são os tipos de atuadores e elementos de transmissão disponíveis, bem como seus principais aspectos favoráveis e desfavoráveis para a correta definição de quais serão empregados na aplicação em questão. Na Matriz Morfológica da Tab. (1) foram levantadas as opções de o acionamento das juntas ser feito eletricamente (motor cc, servo motor e motor de passo), hidráulicamente e de maneira pneumática.

Os atuadores hidráulicos foram o primeiro método de acionamento de juntas na robótica (Santos, 2015) e até hoje se apresentam como uma solução muito popular. Este tipo de atuador tem (Craig, 2012) como vantagens:

- Tamanho do atuador em si é compacto;
- Conferem elevadas forças e torques sem a necessidade de um sistema de redução;
- Conseguem manter forças e torques constante para uma grande faixa de velocidades e por um grande período de tempo;
- Controle simples; e,
- Ideal para cargas muito elevadas.

Por outro lado, algumas desvantagens dizem respeito a:

- Necessitam de muitos elementos e equipamentos, tais como bombas, acumuladores, mangueiras e servoválvulas;
- São sistemas que causam, no geral, bastante sujeira devido ao vazamento de fluido hidráulico;
- Precisão baixa para o controle de forças; e,
- Necessitam de manutenções constantes para continuarem a apresentar bom funcionamento.

Já os atuadores pneumáticos apresentam:

- Todas as vantagens do sistema hidráulico acrescido do fato de que são mais limpos, pois ao invés de fluido hidráulico o que sai dele é ar;
- Possibilidade de operação a altas velocidades; e,

- Custo comparativamente mais baixo.

Algumas desvantagens que esse tipo de atuador apresenta são:

- Controle difícil e de baixa precisão devido à compressibilidade do ar e do atrito no pistão-cilindro.

Os atuadores elétricos, hoje, constituem a alternativa mais popular para manipuladores dos mais variados tipos (Craig, 2012). Isto, em grande medida, se deve a uma interface de controle mais atrativa e fácil de ser utilizada do que os atuadores pneumáticos e hidráulicos e, ainda, a grande disponibilidade de faixas de torque e velocidade nos modelos comerciais disponíveis (Santos, 2015). A Fig. (36) apresenta como o custo do acionamento elétrico se relaciona com o torque necessário em comparação com os atuadores hidráulicos:



Figura 36 - Custo de braços robóticos em função da capacidade de carga para atuadores hidráulico e elétrico (Carrara, 2015).

Como a capacidade de carga para as WMRAs não é tão elevada, a solução de atuador elétrico se mostra atrativa. Neste ponto é importante analisar de maneira independente cada um dos dois tipos de atuadores elétricos apresentados na Tab. (1).

Os motores cc se referem à classe de motores alimentados por corrente contínua, proveniente de uma bateria por exemplo. Dependendo de como a troca de energia entre o rotor e o estator ocorre – a comutação – ele pode ser por escovas ou *brushless*. Para entregar torques maiores existe uma subcategoria que são os motores cc com redução, muito utilizados para levantar e abaixar vidros de carro por exemplo. Assim as principais vantagens e desvantagens são (SIEMENS, 2006):

- Alto torque na partida e em baixas rotações;
- Facilidade em controlar a velocidade; e,
- Boa relação entre torque e massa do atuador.

Já algumas desvantagens são:

- Necessidade maior de manutenção devido aos comutadores; e,
- Necessidade do uso de *encoders* para monitorar a posição angular.

Os servo motores são motores de corrente contínua que possuem ou não um redutor de velocidades acoplado, juntamente com um sensor de posição e um sistema de controle em malha fechada, ou seja, que se realimenta (Carrara, 2015). No geral são motores compactos e que apresentam uma ampla faixa de torques. Além disso, vale mencionar que o posicionamento angular do servo é feito por meio de um sinal gerado por codificadores ópticos absolutos, incrementais ou por meio de *resolvers*. As principais vantagens de um servo são (Santos, 2015):

- Suavidade em baixas rotações;
- Altos torques de pico, ou seja, em aplicações que não sejam contínuas o motor pode operar com sobrecorrentes;
- Grande variedade de modelos disponíveis; e,
- Operações em altas velocidades.

Já algumas desvantagens são:

- Dissipação térmica ruim; e,
- Custo de instalação elevado.

O motor de passo (Santos, 2015) transforma pulsos elétricos em movimentos mecânicos de incremento fixo, operando em malha aberta, ou seja, não necessitam necessariamente de um sensor no eixo de saída. As suas principais vantagens são:

- Custo baixo;
- Não necessita de manutenções periódicas;
- Estabilidade em paradas;
- Isento de falhas advindas de problemas no driver de acionamento;
- Facilidade de serem substituídos devido à alta padronização dos modelos existentes;
- Boa relação entre torque e tamanho do motor;
- Conexão elétrica simples;
- Resistente a sobrecargas mecânicas; e,
- Seguro, confiável e simples do ponto de vista construtivo.

Por outro lado, apresentam algumas desvantagens, tais como:

- Baixa suavidade em velocidades baixas e com baixa redução; e,
- Perda de posicionamento em situações de sobrecarga devido a malha aberta.

Diante do exposto, principalmente pelo fator do custo, o motor de passo aparece como uma solução mais atrativa para aplicação em questão. Contudo, devido à grande massa desse tipo de motor para torques na casa dos 8 N.m, optou-se também por utilizar motores cc com redutor, uma vez que entregam altos torques e são mais leves comparativamente.

No que tange aos tipos de transmissão e redução de movimento, tem-se dois grupos principais: as transmissões conversoras e as transformadoras (Santos, 2015). O primeiro grupo diz respeito aos elementos mecânicos utilizados para alterar a natureza do movimento, seja pela alteração do eixo do movimento ou então pela natureza em si deste. Alguns exemplos são aqueles onde é necessário converter um movimento rotacional em linear ou vice-versa. Já no grupo das transformadoras o interesse não é só de apenas alterar o tipo de movimento, mas sim de transformar o valor das grandezas físicas envolvidas, tais como velocidade e torque, aumentando ou diminuindo conforme o interesse. Seja qual for o tipo empregado, deve-se atentar a necessidade destes componentes terem elevada rigidez, baixas inércias e massas e, ainda, não apresentarem folgas consideráveis.

Serão tratados os principais aspectos dos elementos listados na Tab. (1) para transmissão mecânica, de maneira breve, evidenciando as principais características e desempenho destes. A primeira a ser analisada é o uso de engrenagens, que podem ser de dentes retos, helicoidais, cônicas ou até mesmo um par parafuso sem-fim e coroa. No geral, é um sistema de baixa complexidade que fornece uma ampla faixa de reduções possíveis, mas que não garante um grande afastamento da junta, por conta da necessidade de contato entre as engrenagens.

No que tange aos trens de engrenagens planetárias ou epicicloidais (TEPs), tem-se que de uma maneira mais compacta, mas também bem mais complexa, é possível prover razões de redução bastante elevadas para aplicações de desempenho elevado.

A transmissão por cabos ou correias pode se dar por meio de uso em laço fechado ou como elementos unilaterais, que se encontram sempre tensionados por uma pré-carga (Craig, 2012). A pré-carga é necessária por conta da flexibilidade que esses elementos possuem. Esses arranjos combinam tanto transmissão quanto redução, fazendo isso a uma distância bastante superior a um par de engrenagens. Baixo custo, facilidade de montagem, acionamento de múltiplos eixos e manutenção simples são outras características relevantes. O desempenho de sistemas com correias é superior ao com cabos e, no geral, este último se restringe a aplicações de pequenos robôs.

No que tange a transmissão por correntes os principais aspectos estão relacionados a alta durabilidade e ausência de escorregamento relativo entre os componentes (que também pode ser

observada nas correias, desde que estas sejam dentadas), elevada rigidez, peso e custos elevados. Por fim para as hastes rígidas, tem-se baixas reduções possíveis, baixa amplitude de movimento, capacidade de carga limitada pela flambagem das hastes e alta rigidez.

Diante dessa breve análise sobre os tipos de transmissão, decidiu-se a partir das especificações de tarefa e características que o mais desejável é de utilizar pares de engrenagens.

A análise aprofundada do sistema de controle do robô foge do escopo do presente trabalho, contudo, pode-se, de maneira bem ampla e breve, destacar que os Controladores Lógicos Programáveis (CPLs) e as *Peripheral Interface Controller* (PICs) são soluções mais robustas e mais caras para serem aplicadas. Assim, os microcontroladores, tais como o *Arduino* e o *Raspberry* se posicionam como soluções mais atrativas. Entre os dois, o *Arduino* se mostra mais simples para o uso e implementação.

Por fim, diante de todas as análises das partes e funções da Matriz Morfológica, realiza-se a construção das soluções com base na escolha das mais atrativas alternativas para cada função, a partir da Fig. (33), como ilustrado na Fig. (37):

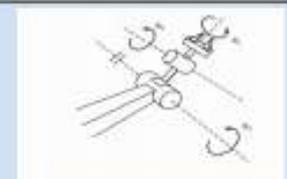
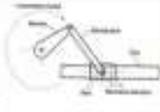
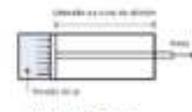
| | | | | | | |
|-------------------------------|--|---|---|---|--|---|
| Material |  Aço |  Alumínio |  PVC |  Plástico PLA/ABS |  Fibra de Carbono |  Nylon (TechNyl) |
| Configuração |  SCARA |  Articulado |  Esférico |  Cilíndrico | | |
| Punho |  2 juntas rotativas |  3 juntas rotativas (punho esférico) |  3 juntas rotativas com eixos que não se cruzam em um mesmo ponto | | | |
| Efetuator terminal |  Garra de 2 dedos |  Garra de 3 dedos |  Ferramenta |  Garra a vácuo | | |
| Transmissão |  Engrenagens |  Correias |  Correntes |  TEPs |  Hastes Rígidas |  Cabos |
| Acionamento das Juntas |  Motor CC |  Servo motores |  Motores de Passo |  Hidráulico |  Pneumático | |
| Controle |  Arduino |  Peripheral Interface Controller (PIC) | |  Controlador Logico Programável (CLP) |  Rasperry | |

Figura 37 - Funções mais atrativas da Matriz Morfológica após análise.

3.4 SELEÇÃO

Nesta etapa o objetivo é de definir qual será a solução adotada para resolver o problema a partir das funções mais atrativas da Matriz Morfológica após análise, conforme a Fig. (37). Tem-se por objetivo também discutir aspectos que porventura não tenham sido explorados na etapa de Análise e que sejam relevantes para o desenvolvimento do projeto.

No que tange ao perfil a ser utilizado para os elos é importante fazer uma análise complementar às já feitas. Para se decidir entre o perfil quadrado oco e o perfil circular, lança-se mão das equações de deflexões de viga para um caso de uma viga de mesmo tamanho, mesmo material, mesma área de seção, espessura de parede zero e mesma força aplicada em magnitude e posição, alterando somente o perfil da área. O eixo de flexão considerado para a seção quadrada maciço é a diagonal. Divide-se a Eq. (2-50) pela (2-51) para avaliar qual será mais vantajoso do ponto de vista da resistência à flexão, assim, tem-se que:

$$\frac{k_{circulo}}{k_{quadrado}} = \frac{3\pi E d^4}{64 l^3} \frac{4 l^3}{E w^4} = \frac{3\pi d^4}{16 w^4} \quad (3-1)$$

Como a área da seção é a mesma, tem-se que:

$$\frac{\pi d^2}{4} = w^2 \quad (3-2)$$

Substituindo (3-2) em (3-1), tem-se:

$$\frac{k_{circulo}}{k_{quadrado}} = \frac{3}{\pi} \quad (3-3)$$

Assim, nota-se que o perfil quadrado maciço é mais rígido que o perfil circular com a mesma área e condições de contorno e carregamento iguais. No caso dos perfis circulares e quadrados ocos se torna mais difícil determinar qual é mais rígido, pois a espessura da parede pode compensar. Assim, de maneira análoga, chega-se a seguinte expressão para a rigidez de tubos circulares em relação aos quadrados ocos:

$$\frac{k_{tubo\ circular}}{k_{quadrado\ oco}} = \frac{3\pi E (d_e^4 - d_i^4)}{64 l^3} \frac{4 l^3}{E (w_e^4 - w_i^4)} = \frac{3\pi (d_e^4 - d_i^4)}{16 (w_e^4 - w_i^4)} = \frac{3 (d_e^2 + d_i^2)}{4 (w_e^2 + w_i^2)} \quad (3-4)$$

Contudo, na maior parte das vezes o tubo circular acaba sendo a melhor alternativa, pois para um mesmo peso ele possui maior resistência à flexão e à torção.

O próximo aspecto a ser analisado para a definição da solução diz respeito ao posicionamento que o manipulador terá sobre a cadeira de rodas, podendo ser de três tipos (D. Edwards, 2005): montagem traseira (*rear mounting*), montagem lateral (*side mounting*) e montagem frontal (*front mounting*). As Figs. (38), (39) e (40) apresentam, respectivamente, cada um desses tipos de montagem:

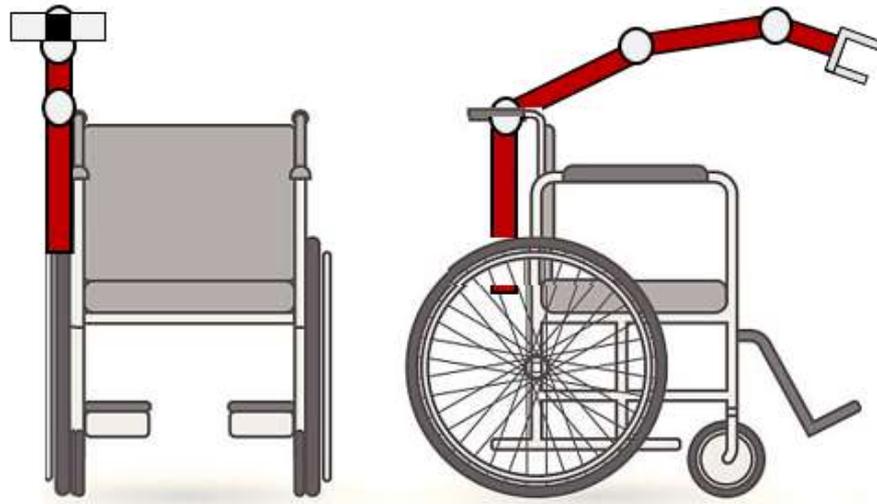


Figura 38 - Esquema de montagem traseira.

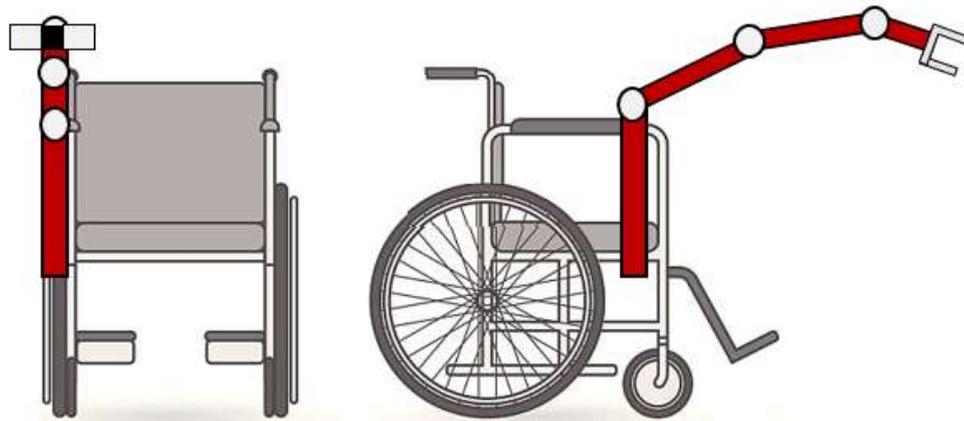


Figura 39 - Esquema de montagem lateral.

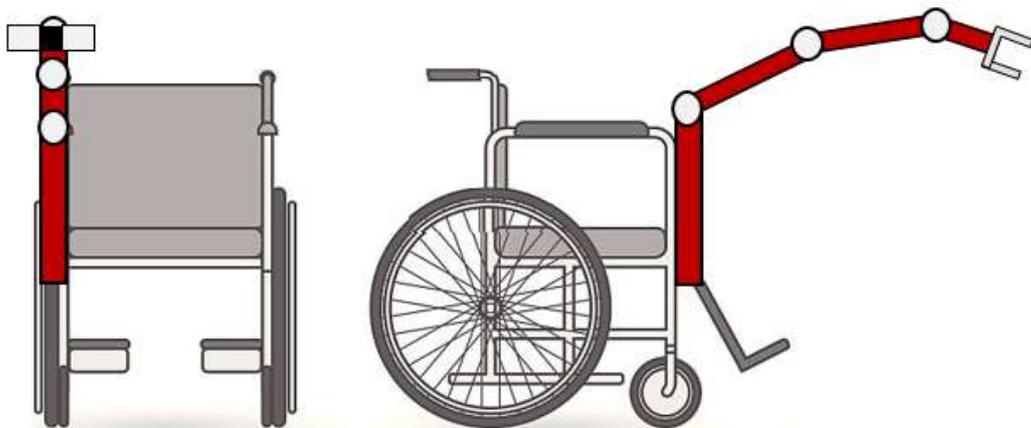


Figura 40 - Esquema de montagem frontal..

Para a correta tomada de decisão de qual localização de montagem usar, destacam-se as principais características de cada um desses tipos de montagem (D. Edwards, 2005) sobre a cadeira de rodas. Para a montagem traseira se tem a vantagem de não aumentar a largura da cadeira de rodas, possibilitando o acesso a lugares cujas dimensões se aproximem do limite das distâncias previstas na norma (ABNT, 2015). Outra vantagem diz respeito a possibilidade de se armazenar o braço robótico atrás da cadeira de rodas, quando não estiver em uso, o que apresenta um apelo estético atrativo. Destaca-se, ainda, que com esse tipo de posicionamento de montagem a intrusão do braço é mínima para o usuário. Por outro lado, no entanto, esse tipo de posicionamento demanda um aumento excessivo nos comprimentos dos elos, ocasionando torques necessários mais acentuados e, conseqüentemente, um acréscimo na massa total do sistema. Outro ponto negativo é a grande limitação em executar tarefas nas regiões a frente da cadeira de rodas.

Já a montagem lateral apresenta um problema que é o aumento da largura da cadeira de rodas, o que pode impossibilitar o translado do cadeirante em determinadas áreas com conforto e segurança. Sua localização de montagem é abaixo da altura do apoio de braços Fig. (20) e, além disso, também neste caso, tem-se uma necessidade de se aumentar os comprimentos dos elos, o que ocasiona, como já mencionado, a necessidade de se selecionar atuadores que forneçam mais torque, sendo estes mais pesados e mais caros. Por outro lado, contudo, sua intrusão é também bastante baixa ao usuário. Vale destacar que é o tipo de montagem mais recorrente entre as WMRAs.

Por fim, a montagem frontal confere facilidade em acessar o ambiente a frente do cadeirante. Sua montagem se dá na altura dos joelhos o que permite alcançar objetos a alturas elevadas em relação aos demais arranjos. Contudo, seus principais problemas estão relacionados ao aspecto estético precário e também à intrusão alta, dificultando, por exemplo, que o cadeirante consiga posicionar seus membros inferiores embaixo de uma mesa.

A montagem lateral, apesar de atenção especial para não aumentar demasiadamente a largura da cadeira, foi escolhido pois é o tipo que provê melhor equilíbrio entre intrusão e possibilidade de compactar sobre si próprio (D. Edwards, 2005). Vale se atentar ao tipo de cadeira de rodas sobre a qual o braço robótico será montado, motorizada de fábrica ou não, para se definir a posição exata do robô sobre ela.

Para conseguir desenvolver o projeto é importante adotar uma cadeira de rodas como a referência, em termos de aspectos construtivos e dimensões. Para tanto será utilizada a cadeira de rodas disponível no laboratório do GRACO (Grupo de Automação e Controle & Grupo de Inovação em Automação), a qual foi objeto de estudo (Vidal Filho, Avila, Quinteros, Queiroga, & Van Els, 2010) no desenvolvimento de um kit para automação que se adaptasse a ela, por se tratar de uma cadeira de rodas convencional dobrável, conforme ilustra a Fig. (41):



Figura 41 - Cadeira de rodas base disponível no laboratório do GRACO.

As principais características da cadeira de rodas da Ortobras em questão se encontra no Anexo I.

Por fim, definem-se os principais parâmetros construtivos do robô: alcance, *payload* e a meta de massa para o manipulador. Para a definição do alcance utilizam-se os conceitos explorados na revisão bibliográfica da NBR 9050 e também a análise do alcance das WMRAs existentes da Tab. (1), assim, tem-se da Tab. (1):

$Alcance_{m\u00e9dio} =$

$$\frac{(Alcance_{JACO} + Alcance_{Manus\ Arm} + Alcance_{Manus\ Arm\ +\ adicional} + Alcance_{Weston} + Alcance_{Kares} + Alcance_{Mats} + Alcance_{USF} + Alcance_{Rapuda})}{8} \approx 108\ cm \quad (3-5)$$

Não é desejado que as dimensões do módulo de referência, da Fig. (22), sejam extrapoladas. Além disso, objetiva-se realizar uma montagem lateral, assim, pela Fig. (21), tem-se pela vista lateral que a faixa possível de posições para montagem varia de 0,42 a 0,45 m, de um comprimento total de cadeira de 1,15 m. Aspectos relativos à largura, Figs. (23), (24) e (25) acrescentada à cadeira de rodas por conta do braço robótico serão analisadas no decorrer do projeto mecânico.

Com base nas Fig. (26), tem-se que o alcance manual frontal máximo na horizontal, de uma pessoa em cadeira de rodas com superfície de trabalho em sua frente, varia de 0,50 a 0,55 m. Enquanto que o alcance máximo na vertical, sob a mesma condição considerada anteriormente, varia de 0,45 a 0,75 m.

Já na Fig. (27), tem-se que o alcance manual lateral máximo, na horizontal, sem deslocamento de tronco varia de 0,50 a 0,55 m.

Tem-se na Fig. (42) as principais posições que o robô deverá ser capaz de alcançar:

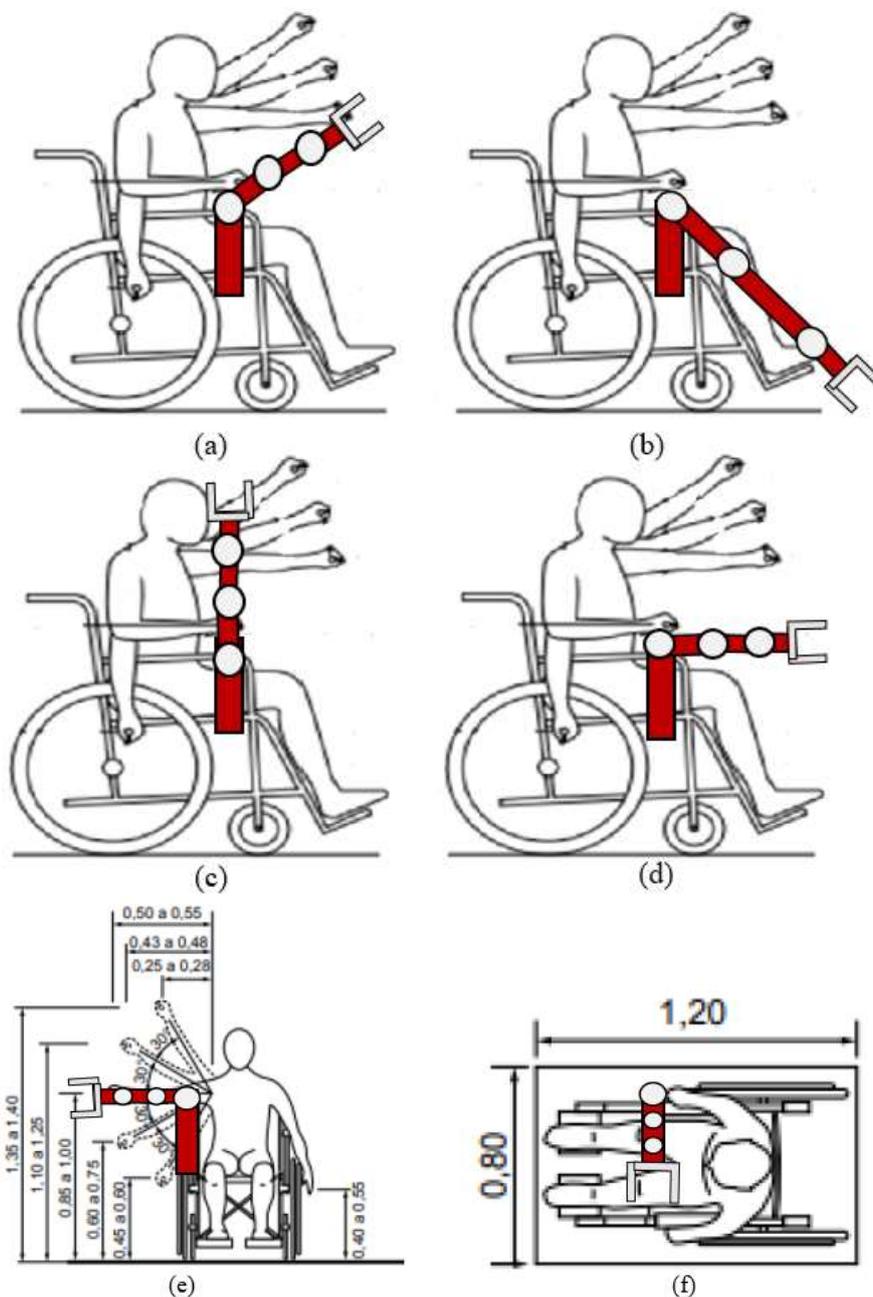


Figura 42 - Principais posições que o manipulador deverá ser capaz de alcançar.

Para tais posições acontecerem é preciso que o tamanho total do manipulador, com base nas dimensões da Fig. (26), seja, para cada caso, conforme a Fig. (43) e Tab. (5) que resumo os comprimentos totais que o manipulador deve assumir para cada caso da Fig. (42). Note que o caso (f) é igual ao caso (e) só que de outra vista:

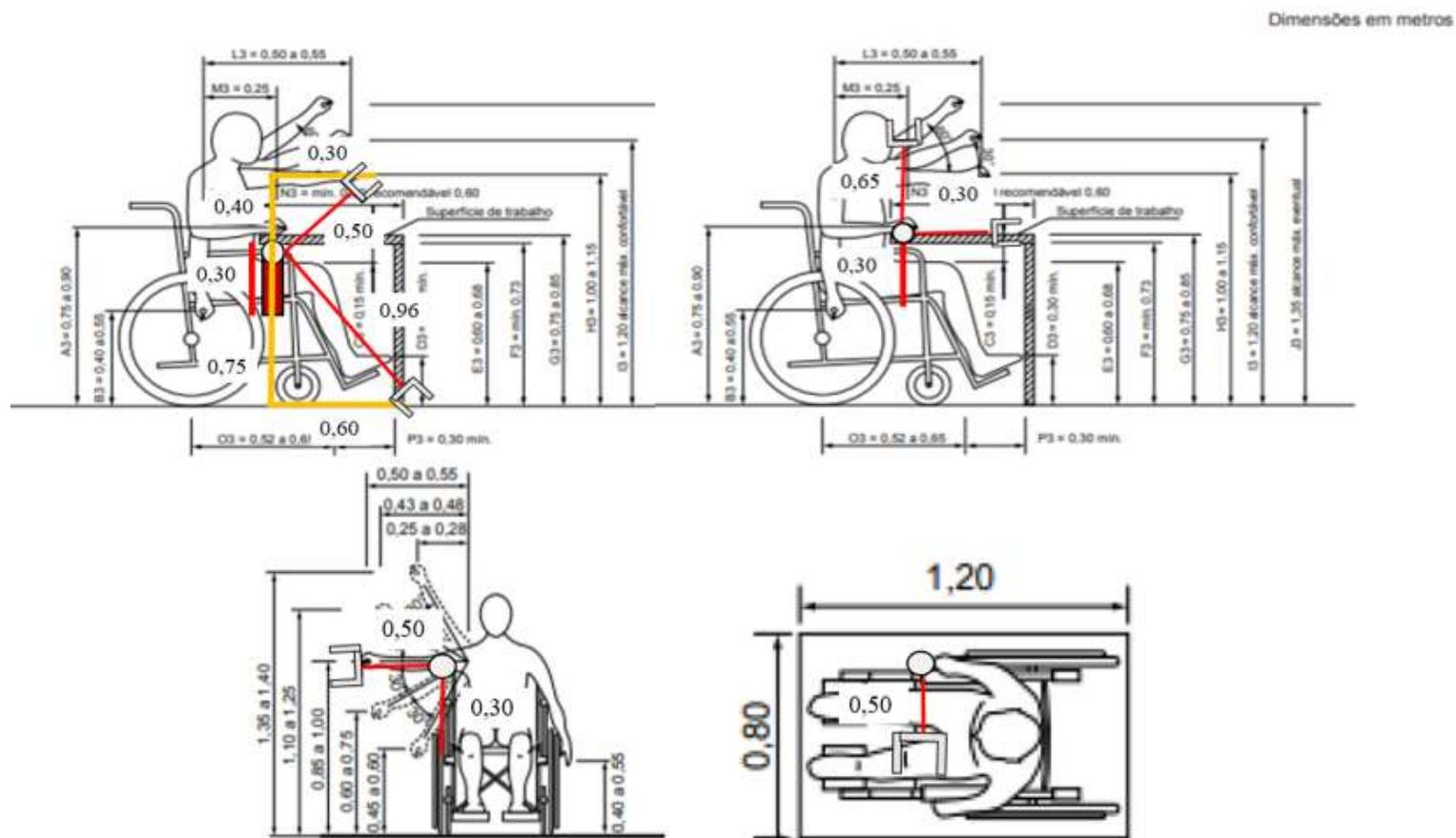


Figura 43 – Comprimentos totais que o manipulador deve assumir.

Tabela 5 - Comprimentos totais que o manipulador deve assumir para cada caso da Fig. (44).

| | Caso (a) | Caso (b) | Caso (c) | Caso (d) | Caso (e) | Caso (f) |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Comprimento total do manipulador | 0,50 m | 0,96 m | 0,65 m | 0,30 m | 0,50 | 0,50 |

Assim vê-se que as análises feitas com a norma e com as soluções de WMRA's estão em consonância. Para tanto, será utilizado como meta para o comprimento total do manipulador o comprimento médio entre o caso (b) e o (3-5), que é de 1,02 m, que será aproximado para 1,1 m.

No que tange ao *payload*, a análise é feita com base na média das capacidades de carga dos robôs existentes, excluindo o maior valor, USF, e o menor valor, KARES, para evitar que a média seja influenciada pela grandeza de tais valores. Assim, com base na Tab. (1), tem-se:

$payload_{médio} =$

$$\frac{(payload_{JACO} + payload_{JACO+adicion} + payload_{Manus Arm} + payload_{Rapuda})}{4} = 1,125 \text{ kg} \quad (3-6)$$

Assim, terá como meta o *payload* máximo de 1,2 kg.

Para a massa total do manipulador a análise é análoga a feita para o *payload*. Neste caso, contudo, exclui-se o valor do KARES, maior valor, e do JACO, menor valor. Assim, tem-se:

$massa_{média} =$

$$\frac{(massa_{Manus Arm} + massa_{Mats} + massa_{US} + massa_{Rapuda})}{4} = 9,625 \text{ kg} \quad (3-7)$$

Assim, a meta de massa total máxima para o manipulador é de 10 kg.

3.5 FATOR DE SEGURANÇA GLOBAL DO SISTEMA

Por mais cauteloso e experiente que o projetista seja, no projeto de um sistema mecânico sempre estarão presentes incertezas e variabilidades associadas a alguns parâmetros e, assim, riscos envolvidos. Para mitigar tal fato, utiliza-se o fator de segurança. Contudo, tal fator deve ser escolhido com cuidado, uma vez que consequências inaceitáveis podem ocorrer caso este assuma um valor muito baixo ou muito alto. Para definir o fator de segurança global do sistema, utiliza-se um método (Collins, 2006) que segmenta a decisão em partes menores semiquantitativas, os fatores de penalização, que são ponderadas para se chegar ao valor do fator de segurança para o projeto. Os critérios a serem avaliados para o uso do método são:

- Precisão com a qual as cargas, forças, deflexões ou outros agentes causadores de falha podem ser determinados;
- Precisão com a qual as tensões podem ser determinadas a partir dos agentes causadores de falha;
- Precisão da resistência à falha para o material a ser utilizado;
- Necessidade de restrição do material, peso, espaço ou custo;
- Gravidade das consequências das falhas para seres humanos ou patrimônio material nos arredores;
- Qualidade da fabricação;
- Condições de operação; e,
- Qualidade da inspeção e da manutenção disponíveis durante a operação.

Para cada um dos fatores de penalização (NPs) é atribuído um número de penalização que pode variar de - 4 até + 4, no qual os valores positivos buscam elevar o fator de segurança, enquanto que os valores negativos buscam reduzi-lo. Números de penalização iguais a -1 ou 1 indicam que uma mudança é levemente necessária no fator de segurança. Quando igual a -2 ou 2 indica uma mudança moderadamente necessária. Para -3 ou 3 uma mudança fortemente necessária. Para -4 ou 4 uma mudança extremamente necessária e, por fim, igual a 0 não requer mudança no fator de segurança. Em seguida, com os números de penalização já definidos, realiza-se uma soma destes, Eq. (3-8), que fornece o número t (Collins, 2006).

$$t = \sum_{i=1}^8 (NP)_i \quad (3-8)$$

Em posse de t , estima-se o fator de segurança do projeto (FS), por meio das Eqs. (3-9) ou (3-10):

$$FS = 1 + \frac{(10+t)^2}{100}, \text{ para } t \geq -6 \quad (3-9)$$

$$FS = 1,15, \text{ para } t < -6 \quad (3-10)$$

A Tabela (6) reúne os números de penalização para cada critério:

Tabela 6 - Fatores de penalização para o cálculo do FS global.

| Fator de Penalização | Número de penalização adotado (NP) |
|---|------------------------------------|
| Precisão do carregamento | +1 |
| Precisão das Tensões | +1 |
| Precisão da resistência à falha do material | +1 |
| Necessidade de restrição do material, peso, espaço ou custo | -4 |
| Gravidade das consequências das falhas | +3 |
| Qualidade da fabricação | +1 |
| Condições de operação | -4 |
| Qualidade da inspeção e da manutenção | -3 |

Para a precisão do carregamento atribuiu-se um NP de +1, pois as cargas, forças, deflexões ou outros agentes causadores de falhas são conhecidos, contudo, por mais que seja especificado no projeto a carga máxima que pode ser levantada, de 1,2 kg, este é um comando do usuário, o qual pode não respeitar essa limitação e realizar uma atividade que contenha uma carga maior, ultrapassando o *payload* máximo especificado de 1,2 kg. Para a precisão das tensões e precisão da resistência de falha, estabeleceu-se um NP de +1, pois além do mencionado anteriormente, a estrutura não é estática, o que pode implicar numa variação das tensões atuantes. Já para a necessidade de se restringir material e reduzir custos atribuiu-se -4 por ser algo extremamente necessário no escopo do projeto. Como já mencionado, o manipulador atuará muito próximo do cadeirante, assim sendo a gravidade das consequências das falhas requerem fortemente um aumento no fator de segurança, por tanto atribuiu-se o fator +3. A qualidade da fabricação demanda um leve aumento - NP igual a +1 - do fator de segurança, uma vez, que a qualidade das ferramentas disponíveis para fabricar as peças não são as melhores, o que pode acumular e introduzir erros ao sistema. A condição de operação é conhecida, não sendo um ambiente severo, com velocidades baixas e uma carga de trabalho baixa, assim, o NP dado foi de -4. A utilização de WMRA é

acompanhada de manutenções e inspeções periódicas por parte do fabricante, assim, o fator -3 foi dado, porque pode-se reduzir o fator de segurança fortemente com uma rotina de manutenção bem estabelecida.

Calculando t com a Eq. (3-8), tem-se o valor resultante de -4. Assim, utilizando a Eq. (3-9) é obtido o fator de segurança global do sistema como sendo igual a 1,36. Este é o mínimo valor que deve ser satisfeito para o FS.

3.6 RESUMO DO CONCEITO DO PROJETO

Diante de todas as possibilidades, características e análises realizadas nas seções anteriores do capítulo 3 do presente trabalho, apresenta-se o resumo das decisões que formam o conceito do projeto, que é a base necessária para o desenvolvimento do projeto detalhado. A Tabela (7) reúne as metas de projeto para cada aspecto levantado sobre o conceito do braço robótico e a Figura (44) ilustra o conceito do projeto.

Tabela 7 – Metas de projeto para o conceito desenvolvido.

| Aspectos do Conceito | Meta de Projeto |
|---------------------------|---|
| Tarefas | Pegar, posicionar e carregar objetos do dia-a-dia. Abrir e fechar portas |
| Material | PVC, Plástico PLA/ABS, Nylon (TechNyl) e Alumínio |
| Graus de Liberdade | 6 |
| Configuração | Articulado |
| Punho | 3 juntas rotativas com eixos que não se cruzam em um mesmo ponto |
| Efetuator Terminal | Garra de 2 dedos |
| Localização dos Atuadores | Acionamento direto (nas juntas) |
| Tipo dos Atuadores | Motor de Passo e Motor cc com redutor |
| Tipo de Transmissão | Pares de engrenagens |
| Controle | Arduino |
| Localização do Controle | Base do robô |
| Perfil dos Elos | Tubo Circular |
| Cadeira de Rodas base | Ortobras ULX |
| <i>Payload</i> | 1,2 kg |
| Meta de Massa | 10 kg |
| Alcance | 1,1 m |
| FS Global | 1,36 |

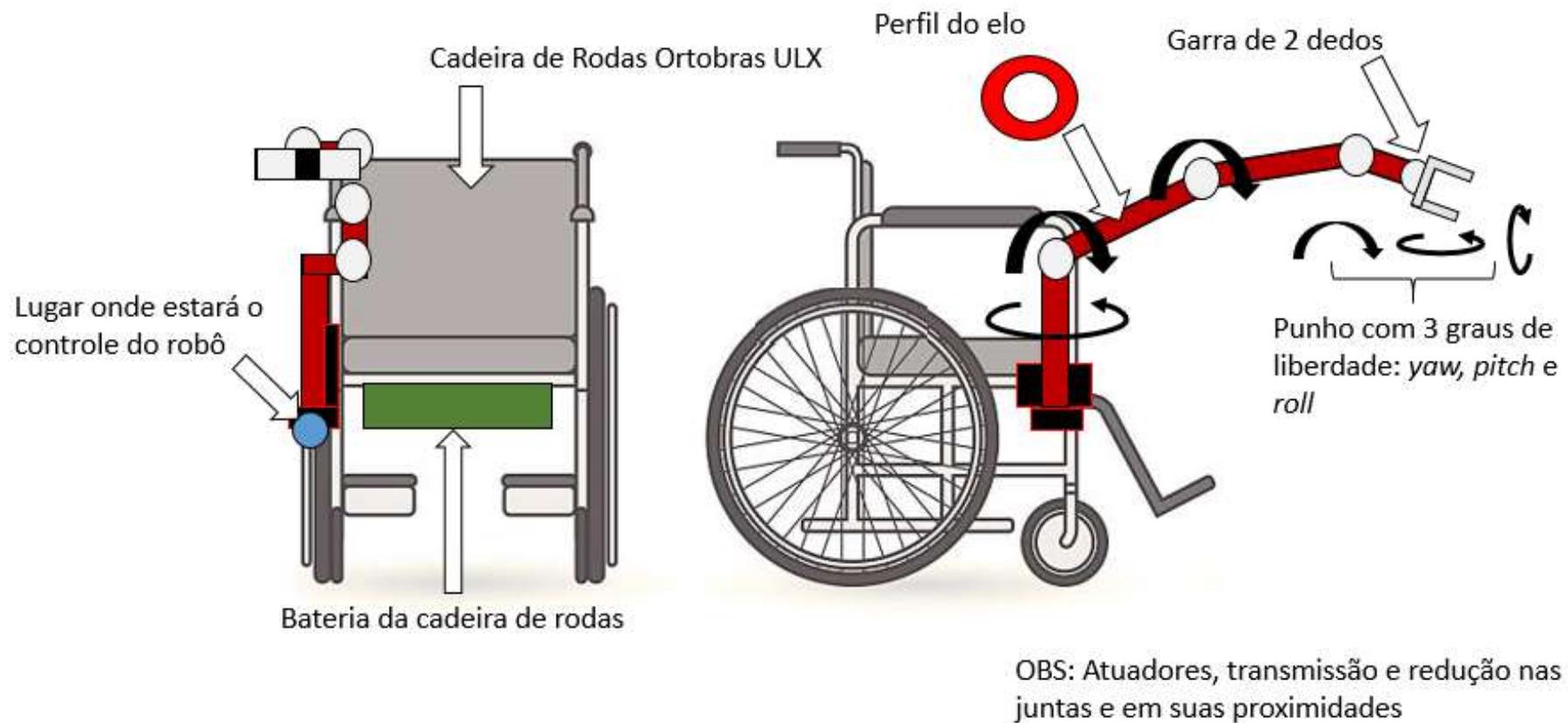


Figura 44 - Conceito final do projeto.

4 PROJETO MECÂNICO

4.1 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO ROBÔ

O próximo passo é de definir as dimensões do robô e sua geometria com base no conceito final do projeto, Tab. (7), e na análise das WMRA's já existentes, Tab. (1). A Fig. (45) ilustra o esquema do robô e as dimensões dos elos principais bem como os limites angulares das juntas, que estão descritas na Tab. (8) e na Tab. (9):

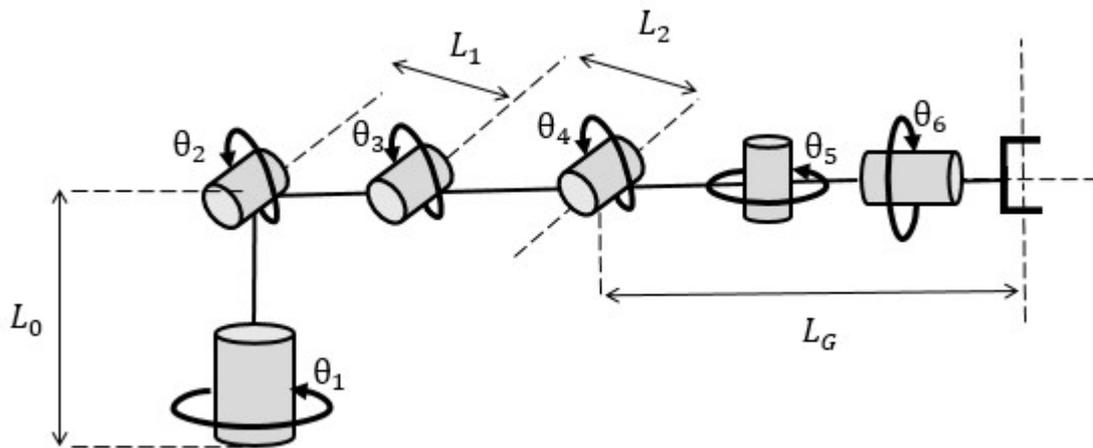


Figura 45 – Dimensões dos elos.

Tabela 8 - Dimensões dos elos.

| | L_0 | L_1 | L_2 | L_G |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Comprimento | 0,17 m | 0,35 m | 0,35 m | 0,35 m |

Tabela 9 – Limites Angulares das Juntas.

| | θ_1 (Base) | θ_2 (Ombro) | θ_3 (Cotovelo) | θ_4 (Pitch) | θ_5 (Yaw) | θ_6 (Roll) |
|----------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Limite Angular | $\pm 90^\circ$ | -45° a $+135^\circ$ | -135° a $+160^\circ$ | $\pm 160^\circ$ | $\pm 90^\circ$ | $\pm 360^\circ$ |

4.2 ANÁLISE CINEMÁTICA

Com isso, seguindo o método D-H, apresentado na revisão bibliográfica, tem-se que a modelagem direta fica conforme a Fig. (46), para a posição zero:

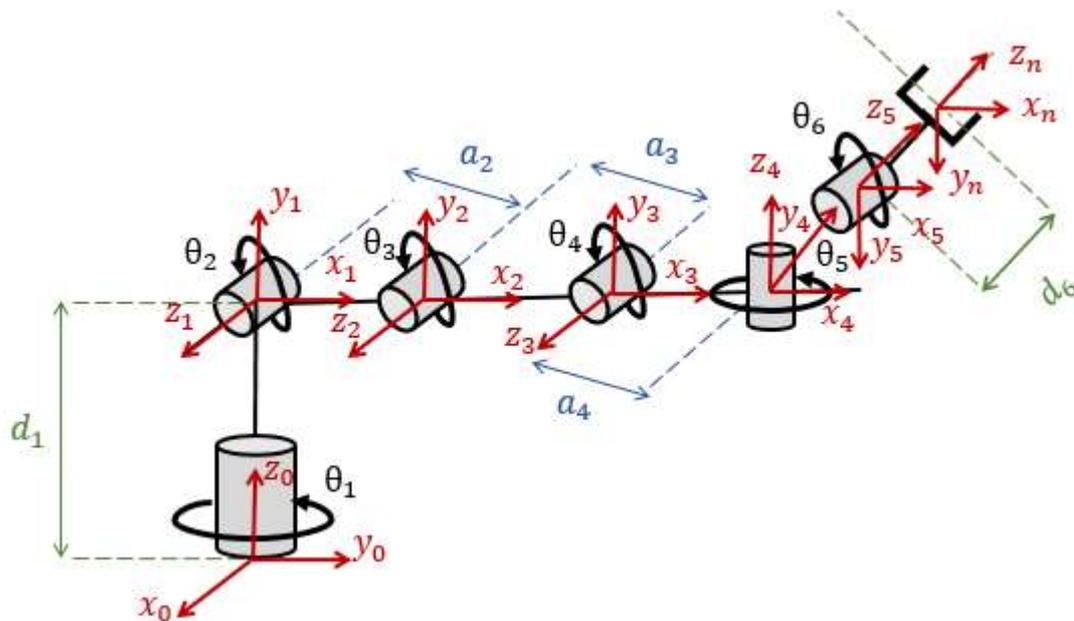


Figura 46 – Modelagem D-H do manipulador

Com a modelagem feita é possível montar a tabela de parâmetros de Denavit-Hartenberg, conforme a Tab. (10):

Tabela 10 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg.

| Junta | θ_i | d_i | a_i | α_i |
|-------|--------------|-------|-------|------------|
| 1 | θ_1^* | d_1 | 0 | + 90° |
| 2 | θ_2^* | 0 | a_2 | 0 |
| 3 | θ_3^* | 0 | a_3 | 0 |
| 4 | θ_4^* | 0 | a_4 | - 90° |
| 5 | θ_5^* | 0 | 0 | - 90° |
| 6 | θ_6^* | d_6 | 0 | 0 |

Em que o * significa que é uma variável que se altera dependendo da posição e orientação do robô.

Em posse Tab. (10), obtém-se a matriz de transformação para cada junta, de i-1 a i, com i variando de 1 a 6:

$${}^1_0\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$${}^2_1\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$${}^3_2\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$${}^4_3\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & a_4C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & a_4S\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$${}^5_4\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & -S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$${}^6_5\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Com essas matrizes, estabelece-se a matriz de transformação homogênea da junta 1 para a 6 a partir dos produtos das matrizes de transformação (4-1), (4-2), (4-3), (4-4), (4-5) e (4-6):

$${}^6_0\mathbf{A} = {}^1_0\mathbf{A}{}^2_1\mathbf{A}{}^3_2\mathbf{A}{}^4_3\mathbf{A}{}^5_4\mathbf{A}{}^6_5\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^6_0\mathbf{R} & {}^6_0\mathbf{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

Com a Tab. (8) e Tab. (10), tem-se os valores dos parâmetros de Denavit-Hartenberg, conforme a Tab. (11):

Tabela 11 – Valores dos parâmetros de Denavit-Hartenberg.

| Junta | θ_i | d_i | a_i | α_i |
|-------|--------------|------------------------|------------------------|-------------|
| 1 | θ_1^* | $d_1 = 0,17 \text{ m}$ | 0 | $+90^\circ$ |
| 2 | θ_2^* | 0 | $a_2 = 0,35 \text{ m}$ | 0 |
| 3 | θ_3^* | 0 | $a_3 = 0,35 \text{ m}$ | 0 |
| 4 | θ_4^* | 0 | $a_4 = 0,15 \text{ m}$ | -90° |
| 5 | θ_5^* | 0 | 0 | -90° |
| 6 | θ_6^* | $d_6 = 0,20 \text{ m}$ | 0 | 0 |

Assim, com o *software MATLAB* e a Tab. (11) é possível calcular as Eqs. (4-1) a (4-7), conforme Apêndice I.

Com a matriz de transformação homogênea é possível calcular a posição e orientação do efetuador terminal com os parâmetros de entrada, sendo estes as posições de todas as juntas.

4.3 ROBOTICS TOOLBOX

Com a modelagem por Denavit-Hartenberg e a matriz de transformação homogênea é possível utilizar a *Robotics Toolbox for MATLAB (RTB)* para representar esquematicamente o robô, realizar cálculos de cinemática direta e inversa, planejar trajetórias do efetuador terminal, analisar dinamicamente o manipulador, simular movimentos, entre outras funções.

A RTB é um projeto *open-source*, distribuído gratuitamente e desenvolvido pelo professor Peter Corke, da universidade de *Queensland of Technology* na Austrália, para o *software MATLAB*. Toda documentação é aberta e pode ser modificada (Corke, 2011).

Assim, modelou-se o robô, conforme o programa do Apêndice II, para três configurações de juntas pré-determinadas, são elas:

$$q_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; q_r = \begin{pmatrix} 0 \\ \pi/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; q_g = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8\pi/9 \\ -8\pi/9 \\ -\pi/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-8)$$

Tais configurações estão representadas nas Figs. (47), (48) e (49) respectivamente:

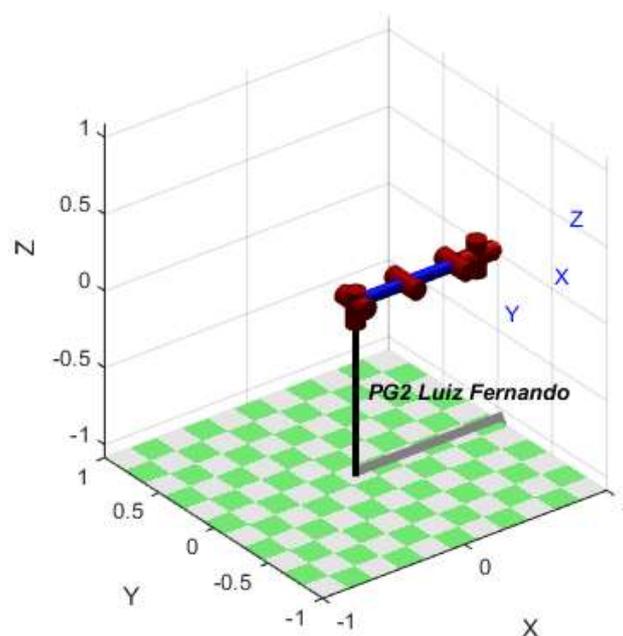


Figura 47 - Representação do Robô pela RTB na configuração q_z .

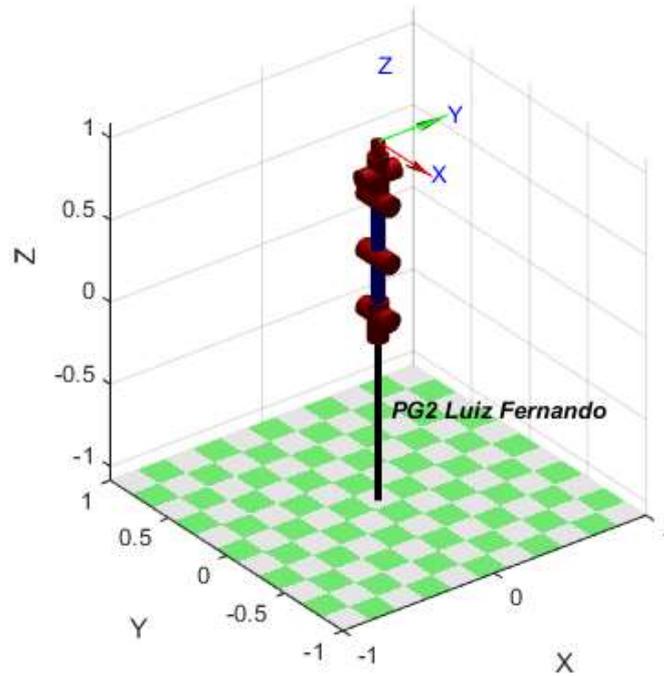


Figura 48 - Representação do Robô pela RTB na configuração q_r .

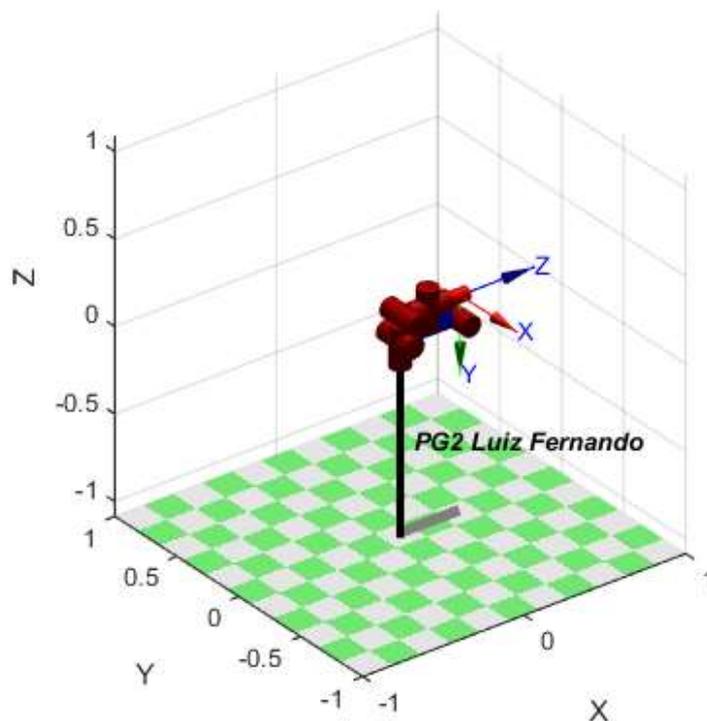


Figura 49 - Representação do Robô pela RTB na configuração q_g .

A configuração q_z é aquela em que todos os ângulos de junta são iguais a zero. Já a q_r se refere ao robô esticado na vertical e, por fim, q_g são os ângulos de junta para o manipulador se recolher sobre si.

Além disso, pode-se ainda com o recurso *teach* da *toolbox* realizar o controle de cada junta do manipulador, conforme a Fig. (50):

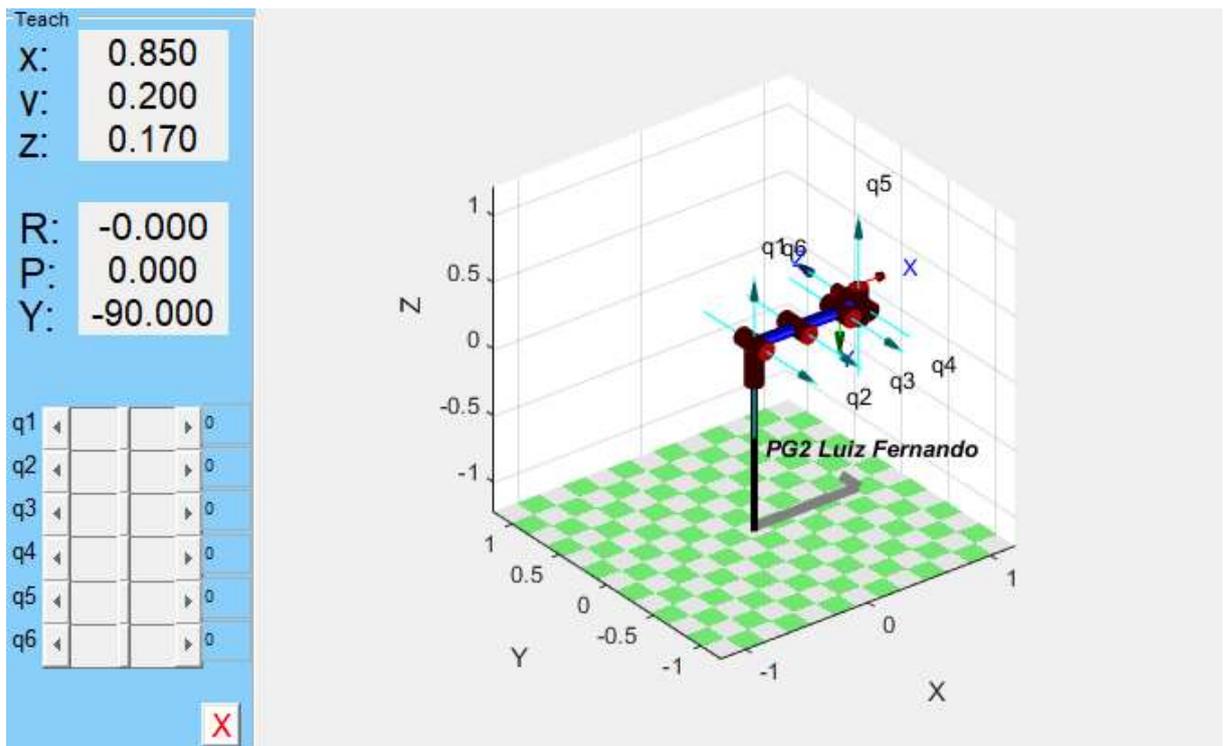


Figura 50 - Interface de controle junta a junta na RTB.

4.4 ANÁLISE DINÂMICA

A análise dinâmica do manipulador é crítica para a seleção dos atuadores, projeto das juntas, eixos, sistema de redução, rolamentos e para o controle do robô. Para tanto, utilizaram-se dois métodos diferentes para realizar o seu cálculo. A primeira abordagem é a mais simples e corresponde a uma estimativa de quais serão os torques atuantes por meio do equilíbrio de forças e momentos, considerando o robô como uma viga engastada. Já a segunda abordagem corresponde à aplicação da equação de Newton-Euler, a qual fornece, com mais exatidão, valores sobre os torques atuantes.

A primeira abordagem considera o robô esticado na horizontal, ou seja, com todos os seus ângulos de junta igual a zero, conforme a Fig. (47) para a configuração q_z . Esta configuração é o pior cenário haja visto que os braços de alavanca serão maximizados, conforme mostra a Fig. (51):

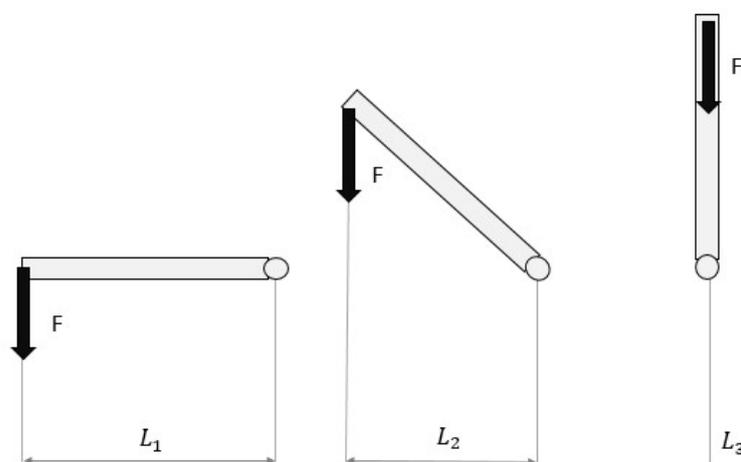


Figura 51 - Braços de Alavanca para diferentes posição dos elos.

Esta abordagem considera também os três graus de liberdade da garra como um só e, ainda, não considera o grau de liberdade da base. Assim, a Fig. (52) ilustra essas considerações:

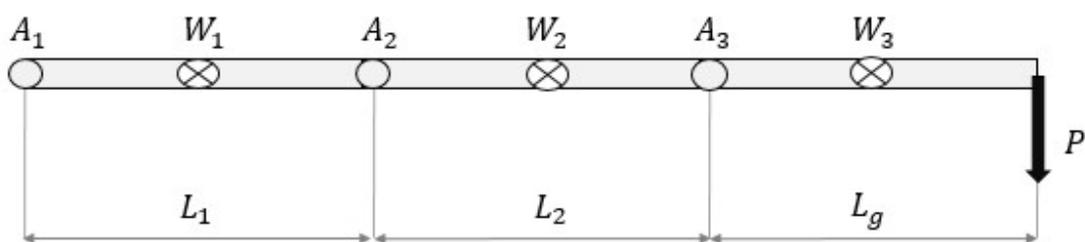


Figura 52 - Esquema da primeira abordagem.

Em que, A_i é o peso dos atuadores nas juntas, W_i é o peso dos elos – considerando o centro de massa na metade do elo - com i variando de 1 a 3 e P é o *payload*.

A primeira abordagem, em resumo, constitui-se de um balanço de momentos, ou seja, não estão previstos os torques dinâmicos, mas somente os torques estáticos necessários para manter o robô na posição mencionada. Essa aproximação é válida, uma vez que, no geral, o termo dominante para se

manter o robô estacionário ou se movimentando a uma velocidade baixa é o advindo das forças gravitacionais, ou seja, o torque estático (Corke, 2011). Assim, três balanços de momento são realizados:

$$T_3 = W_3 \frac{L_g}{2} + PL_g \quad (4-9)$$

$$T_2 = W_2 \frac{L_2}{2} + A_3 L_2 + W_3 \left(L_2 + \frac{L_g}{2} \right) + P(L_2 + L_g) \quad (4-10)$$

$$T_1 = W_1 \frac{L_1}{2} + A_2 L_1 + W_2 \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) + A_3 (L_1 + L_2) + W_3 \left(L_1 + L_2 + \frac{L_g}{2} \right) + P(L_1 + L_2 + L_g) \quad (4-11)$$

A Fig. (53) representa os diagramas de corpo livre para cada equação de (4-9) a (4-11):

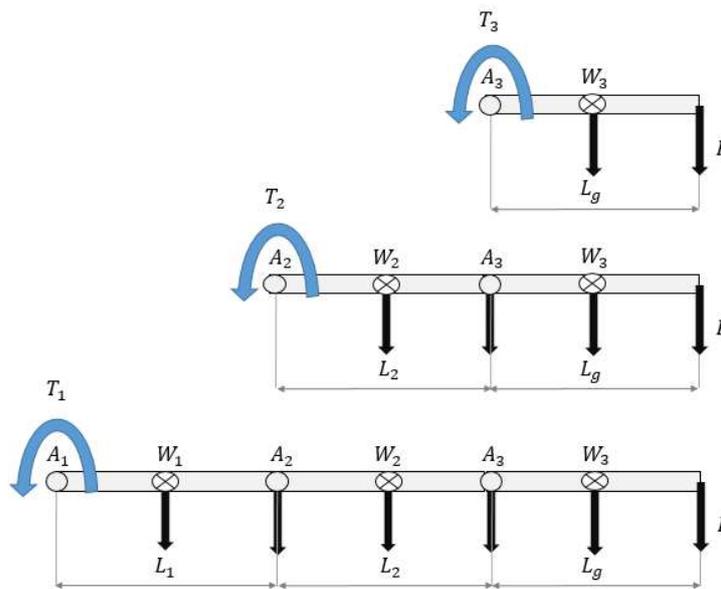


Figura 53 - Diagramas de corpo livre para as equações de (4-9) a (4-11).

Inicialmente as massas dos atuadores nas juntas não são conhecidas, assim se considera para eles um valor arbitrário, que no caso do projeto foi de 1 kg. Posteriormente com os torques calculados, seleciona-se motores que atendam ao calculado e se substitui a massa dos atuadores com os valores fornecidos pelos catálogos destes motores, recalculando os torques. Verifica-se se os motores selecionados continuam atendendo o novo torque mencionado, caso não atendam o processo é repetido.

Para calcular as massas dos elos e, conseqüentemente, os pesos é preciso saber as dimensões da seção. Como definido no projeto conceitual, optou-se por um tubo de seção circular de PVC, o qual tem as dimensões apresentadas na Tab. (12) (ABNT, 2018):

Tabela 12 - Dimensão da seção do tubo de PVC utilizado.

| Bitola | Diâmetro Externo (mm) | Diâmetro Interno (mm) | Parede (mm) |
|--------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 50 | 50,0 | 44,0 | 3,0 |

Assim, tem-se para a massa e para o peso as relações (4-12) e (4-13):

$$m_i = \rho\pi(R^2 - r^2)L_i \quad (4-12)$$

$$W_i = \rho\pi(R^2 - r^2)L_i g \quad (4-13)$$

Com i variando de 1 a 3, ρ dado pela Tab. (2), R sendo o raio externo do tubo e r o raio interno.

Para tanto, realizou-se uma rotina no *MATLAB*, apresentada no Apêndice III, a qual gerou como resultado os seguintes torques para as juntas do manipulador:

Tabela 13 - Torques calculados com a Primeira abordagem.

| Juntas | Torque calculado (N.m) |
|--------|------------------------|
| 1 | - |
| 2 | 24,59 |
| 3 | 13,14 |
| 4 | 4,48 |
| 5 | - |
| 6 | - |

A segunda abordagem utilizada foi a implementação em *MATLAB* da Equação de Newton-Euler, conforme Apêndice IV (Furtado, 2017). Para esta abordagem é preciso realizar o cômputo e definir uma série de parâmetros que descrevem o sistema, são eles: matrizes de rotação, condições iniciais da base, condições iniciais do efetuador terminal, massa dos elos, tensor de inércia, posição do centro de massa de cada elo em relação ao sistema de referência do próprio elo, a posição relativa entre sistemas de coordenadas consecutivos e, ainda, a aceleração máxima atuante nas juntas.

Com as matrizes de transformação, (4-1) a (4-6), calculadas com o *software* MATLAB, extraem-se as matrizes de rotação, ${}_{i-1}^i\mathbf{R}$, que fornecem a orientação do sistema de coordenadas i em relação ao sistema de coordenadas $i - 1$, com i variando de 1 a 6. São elas:

$${}^1_0\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$${}^2_1\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

$${}^3_2\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$${}^4_3\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

$${}^5_4\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & -S\theta_5 \\ S\theta_5 & 0 & C\theta_5 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$${}^6_5\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

Em seguida, encontram-se as posições relativas entre sistemas de coordenadas consecutivos. Assim tais vetores são:

$${}^0\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} m \quad (4-14)$$

$${}^1\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4-14)$$

$${}^2\mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} a_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4-15)$$

$${}^3\mathbf{P}_4 = \begin{bmatrix} a_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4-16)$$

$${}^4\mathbf{P}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4-17)$$

$${}^5\mathbf{P}_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \end{bmatrix} m \quad (4-18)$$

Para se determinar a posição do centro de massa de um elo em relação ao sistema de coordenadas desse próprio elo, utilizou-se o recurso do *software SOLIDWORKS* de cálculo de propriedades de massa. Para tanto, realizou-se as submontagens de cada elo e se estabeleceu o sistema de coordenadas nas suas juntas. Tem-se que:

$${}^0\mathbf{P}_{c0} = \begin{bmatrix} 0,0085 \\ -0,0175 \\ 0,1015 \end{bmatrix} m \quad (4-19)$$

$${}^1\mathbf{P}_{c1} = \begin{bmatrix} 0,2544 \\ 0,0085 \\ -0,0176 \end{bmatrix} m \quad (4-20)$$

$${}^2P_{C2} = \begin{bmatrix} 0,2544 \\ -0,0085 \\ 0,0176 \end{bmatrix} m \quad (4-21)$$

$${}^3P_{C3} = \begin{bmatrix} 0,1146 \\ 0,0365 \\ 0,0000 \end{bmatrix} m \quad (4-22)$$

$${}^4P_{C4} = \begin{bmatrix} 0,1032 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4-23)$$

$${}^5P_{C5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,1000 \end{bmatrix} m \quad (4-24)$$

Além disso, com o recurso do *SOLIDWORKS* mencionado anteriormente, extraiu-se também a massa de cada elo bem como os tensores de inércia em relação ao seu respectivo centro de massa:

$$m_0 = 1,39 \text{ kg} \quad (4-25)$$

$$m_1 = 1,10 \text{ kg} \quad (4-26)$$

$$m_2 = 1,10 \text{ kg} \quad (4-27)$$

$$m_3 = 0,55 \text{ kg} \quad (4-28)$$

$$m_4 = 0,47 \text{ kg} \quad (4-29)$$

$$m_5 = 0,01 \text{ kg} \quad (4-30)$$

$$I_0 = \begin{bmatrix} 0,0097 & -0,0018 & 0,0054 \\ -0,0018 & 0,0136 & -0,0022 \\ 0,0054 & -0,0022 & 0,0078 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-31)$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0,0015 & 0,0001 & -0,0007 \\ 0,0001 & 0,0125 & -0,0002 \\ -0,0007 & -0,0002 & 0,0126 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-32)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0,0015 & -0,0001 & 0,0007 \\ -0,0001 & 0,0125 & -0,0002 \\ 0,0007 & -0,0002 & 0,0126 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-33)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 0,0015 & 0,0010 & 0,0000 \\ 0,0010 & 0,0019 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0031 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-34)$$

$$I_4 = \begin{bmatrix} 0,0002 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0014 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0014 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-35)$$

$$I_5 = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0001 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0001 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4-36)$$

Para a definição das condições iniciais da base, considerou-se que o manipulador está parado sujeito apenas ao efeito da aceleração da gravidade, assim:

$${}^0\omega_0 = [0,0,0]^t \quad (4-37)$$

$${}^0\dot{\omega}_0 = [0,0,0]^t \quad (4-38)$$

$${}^0v_0 = [0,0,0]^t \quad (4-39)$$

$${}^0\dot{v}_0 = [g_x, g_y, g_z]^t \quad (4-40)$$

Já para o efetuador terminal, tem-se um *payload* conforme definido no projeto conceitual de 1,2 kg, assim:

$${}^6f_6 = 11,77 \text{ N} \quad (4-41)$$

$${}^6n_6 = 0 \text{ N.m} \quad (4-42)$$

Por fim, definiu-se a velocidade e a aceleração máxima dos motores das juntas. A velocidade máxima foi definida a partir da Tab. (1) como sendo 15 cm/s, ou seja, 0,14 rad/s, baseada nas especificações dos robôs comerciais JACO e iARM. Para a aceleração máxima considerou-se que o tempo necessário, partindo do repouso, para atingir essa velocidade seria de 2 s, assim, tem-se que a aceleração angular máxima é de 0,07 rad/s².

Vale destacar que nesta abordagem o braço robótico também se encontra esticado na horizontal, ou seja, com todos os ângulos de junta iguais a zero e, ainda, com velocidade nas juntas iguais a zero e aceleração máxima presente. Assim, os resultados encontrados estão dispostos na Tab. (14):

Tabela 14 – Torques calculados com a Segunda abordagem.

| Juntas | Torque calculado (N.m) |
|--------|------------------------|
| 1 | 1,54 |
| 2 | 18,27 |
| 3 | 14,04 |
| 4 | 3,59 |
| 5 | 0,12 |
| 6 | 0,01 |

Com os resultados das três abordagens em mãos, nota-se que o primeiro é de fato uma estimativa, que superdimensiona os torques necessários, mas tem particular importância para conseguir dar a ordem de grandeza e permitir as primeiras modelagens do sistema completo já com os atuadores. A segunda

abordagem, por sua vez, retrata com mais exatidão os torques atuantes e, por meio dela, que serão selecionados os atuadores e os sistemas de redução necessários. Contudo, vale destacar que não estão considerados nessa análise o atrito e as perdas devido aos sistemas de redução do sistema. Uma vez que esses efeitos podem alcançar até 25% do torque necessário para mover o manipulador (Craig, 2005, apud Furtado, 2017, p. 32), faz-se importante a utilização de um fator de segurança, o qual já foi determinado como sendo de 1,36. A Tab. (15) mostra os valores da segunda abordagem para os torques nas juntas corrigidos com o fator de segurança do projeto:

Tabela 15 - Torques necessários nas Juntas com FS = 1,36.

| Juntas | Torque calculado com FS (N.m) |
|--------|-------------------------------|
| 1 | 2,09 |
| 2 | 24,85 |
| 3 | 19,09 |
| 4 | 4,88 |
| 5 | 0,16 |
| 6 | 0,02 |

4.5 SELEÇÃO DOS ATUADORES

Com os torques atuantes nas juntas já com o fator de segurança considerado, Tab. (15), realizou-se a seleção de atuadores capazes de entregar o torque necessário sem que tivessem uma massa própria muito elevada e que se mantivessem com um preço acessível. Assim, para as juntas 2, 3 e 4 se optou por motores cc com redutor e, ainda, uma redução extra por meio de um par de engrenagens no eixo de saída. Já para as juntas 1, 5 e 6 se optou por motores de passo, sendo que o da junta 1 também apresenta uma redução no eixo de saída feita por um par de engrenagens projetado.

Os atuadores selecionados estão dispostos na Tab. (16), seus catálogos com as informações elétricas, as curvas de torque e suas dimensões construtivas estão no Anexo II e as Figs. (54), (55) e (56) os ilustram.

Tabela 16 – Atuadores selecionados.

| Juntas | Tipo de Motor | Especificação | Torque Máximo (N.m) | Massa (kg) | Redução extra necessária | Preço (R\$) |
|--------|----------------------|-------------------------|---------------------|------------|--------------------------|-------------|
| 1 | Motor de Passo | HT23-397/ NEMA 23 | 1,25 | 0,69 | 1:2 | 96,90 |
| 2 | Motor cc com redutor | Mabuchi/LC- 578VA | 9,12 | 0,52 | 1:3 | 68,96 |
| 3 | Motor cc com redutor | Mabuchi/JC- 578VA | 9,12 | 0,52 | 1:2 | 68,96 |
| 4 | Motor cc com redutor | Mabuchi/JC- 578VA | 9,12 | 0,52 | 1:2 | 68,96 |
| 5 | Motor de Passo | 42HS48- 1684/NEMA 17 | 0,44 | 0,35 | 1:1 | 76,24 |
| 6 | Motor de Passo | 42HS48- 1684/NEMA 17 | 0,44 | 0,35 | 1:1 | 76,24 |



Figura 54 - Motor de Passo HT23-397/NEMA 23 (KALATEC Automação, 2019).



Figura 55 - Motor Mabuchi JC/LC-578VA (Mabuchi Motor, 2019).



Figura 56 - Motor de passo 42HS48-1684/NEMA 17 (KALATEC Automação, 2019).

Vale destacar que a escolha de motores cc com redutor em detrimento dos motores de passo nas juntas 2, 3 e 4 se deveu ao grande aumento de massa e de custo para motores de passo para torques mais elevados. Assim, apesar da maior facilidade de controle ser para motores de passo, estes aspectos prevaleceram na decisão do projeto.

4.6 PROJETO DE ENGRENAGENS

Para realizar as reduções necessárias para conferir o torque necessário às juntas, dimensionaram-se pares de engrenagens de dentes retos nas juntas 1, 2, 3 e 4, conforme Tab. (16). A metodologia utilizada foi a da AGMA (*American Gear Manufactures Association*), a qual é uma das entidades responsáveis pela disseminação do conhecimento no que tange o projeto e a análise de engrenagens.

A metodologia da AGMA visa projetar as engrenagens sob dois modos potenciais de falha: falha por fadiga devido à flexão na raiz de um dente ou a falha por fadiga superficial gerada por tensão cíclica de contato, devido ao acoplamento repetitivo dos dentes (AGMA, 1995). De modo geral, a falha por flexão ocorre no caso em que a tensão máxima atuante nos dentes iguala ou excede à resistência de escoamento do material do dente ou quando iguala ou excede o limite de resistência à fadiga por flexão. Já a falha superficial ocorre quando a tensão máxima de contato iguala ou excede o limite de resistência à fadiga superficial (Henriques, 2017).

Todos os cálculos e iterações do projeto de engrenagens foi produzido no *software MATLAB*, Apêndice V. Os parâmetros e equações utilizados estão descritos abaixo.

O primeiro passo foi definir o material das engrenagens. Para tanto, optou-se pelo plástico PLA cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tab. (17):

Tabela 17 - Propriedades mecânicas do Plástico PLA (MATWEB, 2018).

| Material | Massa específica ρ (kg/m ³) | Módulo de Young E (GPa) | Limite de escoamento (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Dureza Brinell (HB) |
|--------------|---|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Plástico PLA | 1290 | 2,79 | 37,5 | 46,8 | 469 |

A escolha do plástico PLA se deu pela boa relação entre propriedades mecânicas e facilidade, rapidez e baixo custo para se fabricar engrenagens com este material. Apesar de que, as juntas 2, 3 e 4, que utilizam o Motor Mabuchi especificado na Tab. (16), já têm no eixo de saída do motor uma engrenagem de aço com 8 dentes, módulo 2, ângulo de pressão de 20°, a qual possui uma dureza maior do que a engrenagem de PLA, o que minimiza a possibilidade de falha do pinhão (engrenagem do motor) evitando a necessidade da troca desses motores por conta desse aspecto em situações de falha.

Arbitrou-se inicialmente uma largura de face de:

$$b = 5 \text{ mm} \quad (4-44)$$

Além disso, estabeleceu-se, além da largura de face e as propriedades mecânicas do plástico PLA, outros parâmetros de entrada, descritos na Tab. (18):

Tabela 18 - Parâmetros de entrada projeto de engrenagens.

| Parâmetro | Valor |
|--|------------------------|
| Confiabilidade (C) | 0,95 |
| Ângulo de Pressão | 20° |
| Vida especificada | 10 ⁷ ciclos |
| Fator de segurança | 1,36 |
| Pinhão: Redução Junta 1 (N) | 18 dentes |
| Redução Junta 1 | 1:2 |
| Pinhão: Redução Junta 2 (N) | 8 dentes |
| Redução Junta 2 | 1:3 |
| Pinhão: Redução Junta 3 (N) | 8 dentes |
| Redução Junta 3 | 1:2 |
| Pinhão: Redução Junta 4 (N) | 8 dentes |
| Redução Junta 4 | 1:2 |
| Módulo (m) | 2 |
| Potência de entrada (H) | 0,007 kW |
| Rotação nominal do eixo de entrada (n) | 35 rpm |

O número de dentes do pinhão da junta 1 foi de 18, que corresponde ao número mínimo de dentes, para que não haja interferência para um par de engrenagens de dentes retos. Já para as demais juntas com redução este valor já está posto pela engrenagem do eixo de saída do motor Mabuchi.

Todas as equações e tabela de parâmetros utilizadas no projeto de engrenagens podem ser encontradas na referência bibliográfica (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016) e (AGMA, 1995).

O projeto contra flexão conta com o seguinte conjunto de equações:

$$W_t = 60000H/n\pi d \quad (4-45)$$

Em que W_t é a carga tangencial nominal transmitida no engrenamento em [kN] e d é o diâmetro primitivo da engrenagem em [mm], o qual é calculado por:

$$d = mN \quad (4-46)$$

A equação fundamental da flexão é dada por:

$$\sigma_F = \frac{W_t K_o K_v K_S K_H K_B}{b m Y_J}, \text{ no SI} \quad (4-47)$$

Em que σ_F é a tensão de flexão, K_o é o fator de sobrecarga, K_v é o fator dinâmico, K_s é o fator de tamanho, K_H é o fator de distribuição de carga, K_B é o fator de espessura de borda e Y_j é o fator geométrico para resistência à flexão.

A equação da tensão de flexão admissível é dada por:

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_{FP} Y_N}{S_F Y_\theta Y_Z}, \text{ no SI} \quad (4-48)$$

Em que σ_{FP} é a tensão de flexão permissível em $[N/mm^2]$, S_F é o fator de segurança, Y_N é o fator de ciclagem de tensão para tensões de flexão, Y_θ é o fator de temperatura e Y_Z é o fator de confiabilidade.

Definindo os fatores mencionados anteriormente, temos que:

- Fator de sobrecarga (K_o):

Este é o fator responsável por levar em consideração as cargas externas aplicadas que superam a carga tangencial nominal W_t em uma determinada aplicação. Considerou-se o K_o igual a 1, o que indica que tanto a fonte de potência quanto a máquina acionada possuem carga uniforme.

- Fator dinâmico (K_v):

Este é o fator responsável por acrescentar no cálculo imprecisões na fabricação e no engrenamento dos dentes de engrenagens em ação. O número de qualidade Q_v é uma tentativa da AGMA de levar em conta os efeitos causados pelo erro de transmissão, ou seja, o afastamento da condição de velocidade angular uniforme do par de engrenagens. Esse número de qualidade de 3 a 7 incluem a maior parte das engrenagens comerciais, já números superiores se referem a qualidades mais precisas. Para tanto, definiu-se Q_v , que seria o limite superior para engrenagens comerciais. Assim, calcula-se com (4-49), (4-50), (4-51) e (4-52) o fator dinâmico.

$$B = 0,25(12 - Q_v)^{2/3} \quad (4-49)$$

$$A = 50 + 56(1 - B) \quad (4-50)$$

$$V = \pi dn/360 \text{ m/s} \quad (4-51)$$

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right)^B, V \text{ em m/s} \quad (4-52)$$

- Fator de tamanho (K_s):

É o fator responsável por refletir a não-uniformidade das propriedades do material causadas pelo tamanho. Utiliza-se a Eq. (4-53), contudo, se o valor resultar em um número menor do que um, deve-se adotar o valor unitário para este fator.

$$K_s = 0,8433(mb\sqrt{Y})^{0,0535} \quad (4-53)$$

Em que Y é o fator de Lewis, o qual para uma engrenagem de 18 dentes retos é igual a 0,309 e para 8 dentes retos é igual 0,163 (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016).

- Fator de distribuição de carga (K_H):

É o fator que reflete a não-uniformidade da distribuição de carga ao longo da linha de contato.

$$K_H = 1 + C_{mc}(C_{pf} C_{pm} + C_{ma} C_e) \quad (4-54)$$

Em que C_{mc} é igual 1, por se tratar de dentes sem coroamento. Já C_{pf} é calculado por:

$$\begin{cases} C_{pf} = \frac{b}{10d} - 0,025, \text{ com } b \leq 25\text{mm} \\ C_{pf} = \frac{b}{10d} - 0,0375 + 4,92(10^{-4})b, \text{ com } 25 \leq b \leq 432\text{mm} \\ C_{pf} = \frac{b}{10} - 0,1109 + 8,15(10^{-4})b - 3,53(10^{-7})b^2, \text{ com } 432 \leq b \leq 1020\text{mm} \end{cases} \quad (4-55)$$

C_{pm} é igual 1,1 por não ser uma engrenagem centralizada entre mancais. C_{ma} é calculado por:

$$C_{ma} = A + BF + CF^2 \quad (4-56)$$

Em que A, B e C são, respectivamente, 0,127; 0,0158 e $-0,930(10^{-4})$, para o caso de unidades comerciais (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016).

Por fim, C_e é 0,8 pois se considera o caso de engrenamento ajustado na montagem.

- Fator de espessura de borda (K_B):

Há casos em que a falha pode ocorrer ao longo da borda da engrenagem e não no filete do dente, isto acontece quando a espessura da borda não suporta por completo a raiz do dente. Considerou-se K_B igual a 1.

- Fator geométrico para resistência à flexão (Y_j):

O fator geométrico de resistência à flexão pode ser obtido a partir da Fig. 14-6 de (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016). O qual fornece Y_j como sendo igual a 0,2 para o caso da engrenagem de 8 dentes retos e ângulo de pressão de 20° , para 18 dentes é igual a 0,31.

- Tensão de flexão permissível (σ_{FP}):

Considerou-se para este fator o valor igual a metade da dureza Brinell do PLA (Furtado, 2017). Ou seja, σ_{FP} igual 234,5 MPa.

- Fator de ciclagem de tensão para tensões de flexão (Y_N):

Considerou-se uma vida de 10^7 ciclos, o que não necessita de correção, adotando-se então um Y_N igual a 1.

- Fator de temperatura (Y_θ):

Considerando que a temperatura de trabalho do robô não supera 120°C , o valor para este fator é igual a 1.

- Fator de confiabilidade (Y_Z):

É o fator responsável por levar em consideração o efeito das distribuições estatísticas das falhas por fadiga do material. Para uma confiabilidade de 0,95, tem-se Y_Z igual a 0,8854, utilizando:

$$Y_Z = \begin{cases} 0,658 - 0,0759 \ln(1 - R), & 0,5 < R < 0,99 \\ 0,50 - 0,109 \ln(1 - R), & 0,99 \leq R \leq 0,9999 \end{cases} \quad (4-57)$$

Já o projeto contra falha por contato conta com o seguinte conjunto de equações:

$$\sigma_c = Z_E \sqrt{W_t K_o K_v K_s \frac{K_H Z_R}{d b Z_I}} \quad (4-58)$$

$$\sigma_{c,adm} = \frac{\sigma_{HP} Z_N Z_W}{S_H Y_\theta Y_Z} \quad (4-59)$$

Em que W_t , K_o , K_v , K_s e K_H já foram determinados para o cálculo da tensão de flexão. E, ainda, tem-se que Z_E é o coeficiente elástico, Z_R é o fator de condição superficial, d é o diâmetro primitivo do pinhão, Z_I é o fator geométrico para resistência à formação de cavidades, Z_N é o fator de ciclagem de tensão, Z_W é o fator de razão de dureza para a resistência à formação de cavidades e σ_{HP} é a tensão admissível de contato.

- Coeficiente elástico (Z_E):

O valor do coeficiente elástico é dependente do material de que é feito as engrenagens em contato, sendo dado por:

$$Z_E = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\mu_p^2}{E_p} + \frac{1-\mu_G^2}{E_G} \right)} \right] \quad (4-60)$$

Em que μ_p e μ_G são os coeficientes de Poisson do pinhão e da coroa e E_p e E_G são os módulos de elasticidade do pinhão e da coroa.

- Fator de condição superficial (Z_R):

O fator de condição superficial considera efeitos adversos provenientes do acabamento superficial, tensões residuais e efeitos plásticos. De acordo com norma AGMA, quando essas condições não estejam presentes no engrenamento, recomenda-se a utilização do fator unitário, por isso Z_R igual a 1.

- Fator geométrico para resistência à formação de cavidades (Z_I):

O fator Z_I considera condições geométricas que condicionam a formação de cavidades, é calculado por:

$$Z_I = \frac{\cos\phi \sin\phi m_G}{2m_N(m_G+1)} \quad (4-61)$$

Em que m_N é igual a 1 e m_G é dado pela razão entre o número de dentes da coroa e do pinhão.

- Fator de ciclagem de tensão (Z_N):

Considerou-se uma vida de 10^7 ciclos, o que não necessita de correção, adotando-se então um Z_N igual a 1.

- Fator de razão de dureza para a resistência à formação de cavidades (Z_W):

É o fator que apresenta os efeitos da diferença na aplicação dos ciclos no pinhão e na coroa. Os dentes do pinhão sofrem um maior número de ciclos, por isso, é comum projetar o pinhão para ter uma dureza maior que a da coroa. Considerou-se Z_W igual a 1.

- Tensão de contato permissível (σ_{HP}):

Considerou-se para este fator o valor igual a metade da dureza Brinell do PLA (Furtado, 2017). Ou seja, σ_{HP} igual 234,5 MPa.

Com todos esses parâmetros calculados no *MATLAB*, obtiveram-se os seguintes resultados, Tab. (19) para os pares de engrenagens de dentes retos projetados para módulo 2 mm em plástico PLA, com ângulo de pressão de 20° .

Tabela 19 - Resultados projeto de engrenagens.

| Engrenagem | Dentes | Diâmetro Primitivo (mm) | Largura de Face mínima calculada (mm) | Largura de Face a ser utilizada (mm) |
|----------------|--------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Pinhão Junta 1 | 18 | 36 | 2 | 7 |
| Coroa Junta 1 | 36 | 72 | 5 | 7 |
| Coroa Junta 2 | 24 | 48 | 5 | 7 |
| Coroa Junta 3 | 16 | 32 | 5 | 7 |
| Coroa Junta 4 | 16 | 32 | 5 | 7 |

Para padronizar a fabricação das engrenagens, estabeleceu-se uma largura de face padrão de 7 mm, maior do que a calculada – já com fator de segurança – para resistir aos esforços.

Vale lembrar que o pinhão das juntas 2, 3 e 4 é de aço, 8 dentes, módulo 2 e já faz parte do eixo de saída do motor Mabuchi selecionado. Além disso, todos os pares de engrenagens possuem um fator de segurança maior do que o especificado no projeto de 1,36. Sendo que, dentre os dois modos de falha, a falha por tensão de flexão é mais crítica do que a da flexão por tensão de contato.

4.7 PROJETO DE EIXOS

Eixos são elementos de máquinas rotativos cuja função é de transmitir potência ou movimento de outros elementos que a eles estão conectados por meio de chavetas, pinos ou estrias (Henriques, 2017). Os eixos estão sujeitos a diversas combinações de esforços torçores, fletores e axiais que podem ou não variar com o tempo. Assim, a metodologia de projeto de eixos é estabelecida a fim de garantir a resistência contra o escoamento, contra a fadiga nos pontos críticos e, de garantir limites para as deflexões lineares e angulares e, ainda, garantir que as velocidades críticas não serão excedidas.

No projeto os esforços considerados atuantes sobre os eixos são aqueles devido ao peso dos componentes do manipulador, das cargas transmitidas no sistema de redução, do torque dos motores e do *payload*. No manipulador, realizou-se o projeto de 4 eixos: eixo a na junta 1, eixo b na junta 2, eixo c nas juntas 3 e 4 e eixo e na junta 5. Na junta 6 devido ao baixo torque e ao baixo esforço de flexão será montado diretamente no eixo do atuador a garra de dois dedos. Já no caso das juntas 3 e 4, os elos, a disposição do atuador e redução são os mesmos, assim sendo, a junta 3 sofre mais esforços do que a junta 4 devido a sua posição na cadeia cinemática, então seu dimensionamento também servirá para a junta 4.

Para realizar o dimensionamento dos eixos contra os modos de falha mencionados é preciso ter como parâmetro de entrada o diagrama de corpo livre dos eixos, os diagramas de esforços internos e, ainda, o material que os eixos terão.

Os diagramas de corpo livre dos eixos a, b, c, d e e estão ilustrados, respectivamente, nas Figs. (57), (58), (59) e (60):

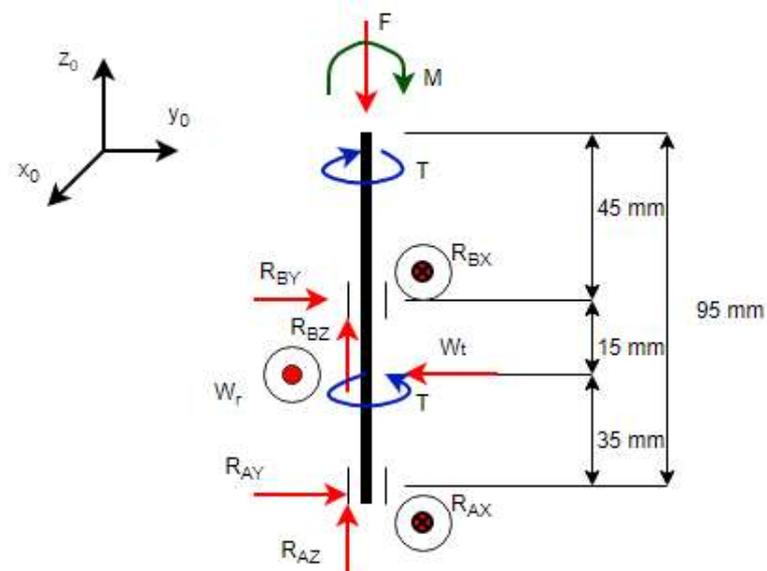


Figura 57 - Diagrama de Corpo Livre eixo a.

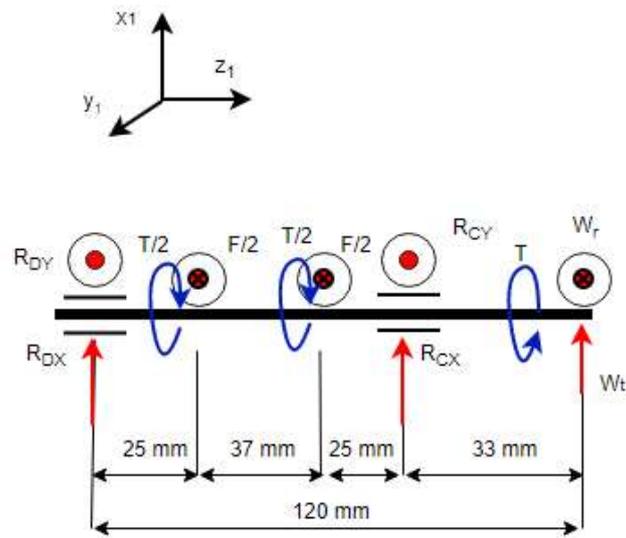


Figura 58 - Diagrama de Corpo Livre eixo b.

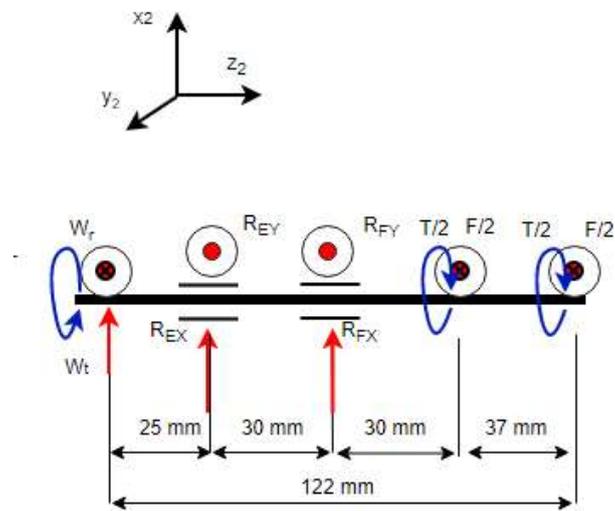


Figura 59 - Diagrama de Corpo Livre eixo c.

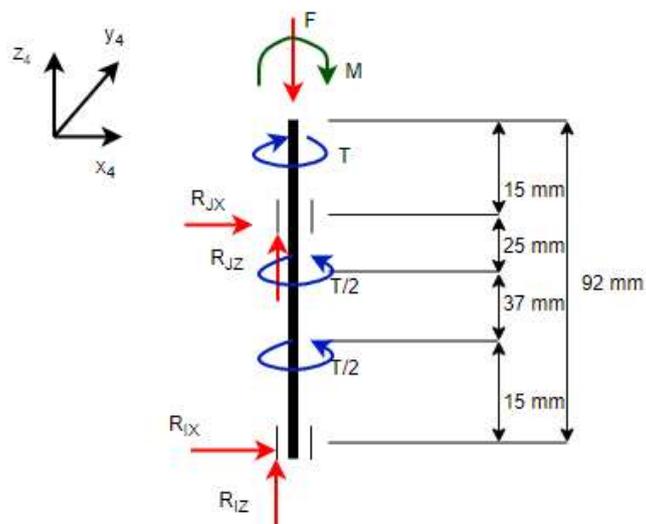


Figura 60 - Diagrama de Corpo Livre eixo e.

O material selecionado para o eixo é o aço de baixo carbono AISI 1045 laminado a frio, o qual tem suas propriedades mecânicas descritas na Tab. (20) (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016):

Tabela 20 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1045 laminado a frio.

| Resistência à tração (MPa) | Resistência ao escoamento (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Módulo de Rigidez (GPa) | Alongamento (%) | Redução de Área (%) | Dureza Brinell (HB) |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 630 | 530 | 205 | 80 | 12 | 35 | 179 |

A Tab. (21) reúne as forças e momentos atuantes em cada eixo bem como as reações nos apoios. Os valores de F e de M são obtidos pela análise dinâmica feita anteriormente, pelo método de Newton-Euler.

Tabela 21 – Forças, momentos e reações nos eixos.

| Eixo | F (N) | M (N.m) | T (N.m) | W_t (N) | W_r (N) | Reações nos Mancais (N) | |
|------|-------|---------|---------|-----------|-----------|---|--|
| a | 57,27 | 28,40 | 1,91 | 106,1 | 38,6 | $R_{AX} = 11,58$ $R_{AY} = 599,83$ $R_{AZ} = 28,64$ | $R_{BX} = 27,02$ $R_{BY} = -493,73$ $R_{BZ} = 28,64$ |
| b | 43,63 | - | 1,91 | 238,7 | 86,9 | $R_{CX} = -329,24$ $R_{CY} = 141,66$ | $R_{DX} = 90,54$ $R_{DY} = -11,16$ |
| c | 32,82 | - | 1,91 | 238,7 | 86,9 | $R_{EX} = -437,62$ $R_{EY} = 106,26$ | $R_{FX} = 198,92$ $R_{FY} = 13,46$ |
| e | 16,55 | 0,48 | 1,91 | - | - | $R_{IX} = 6,2$ $R_{IZ} = 8,3$ | $R_{JX} = -6,2$ $R_{JZ} = 8,3$ |

Com a Tab. (21) e com as equações de equilíbrio de forças e de momentos é possível realizar os diagramas de esforços internos, ou seja, esforço axial, cortante e momento fletor. As Figs. de (61) a (70) ilustram tais diagramas.

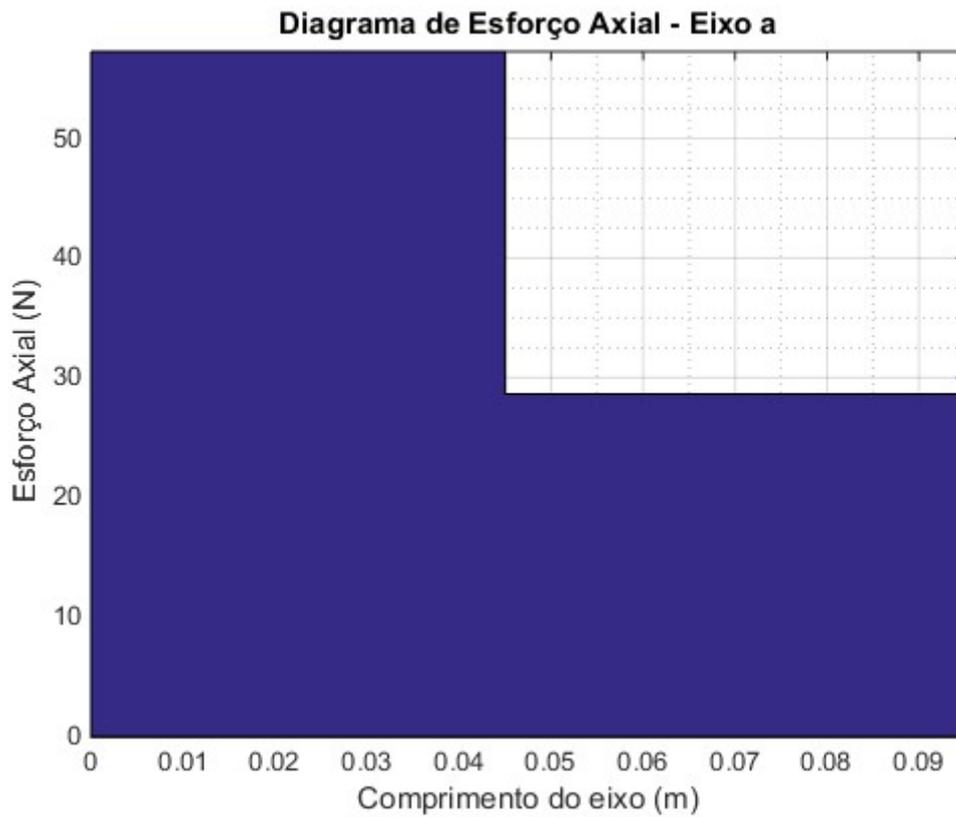


Figura 61 – Diagrama de esforço axial do eixo a.

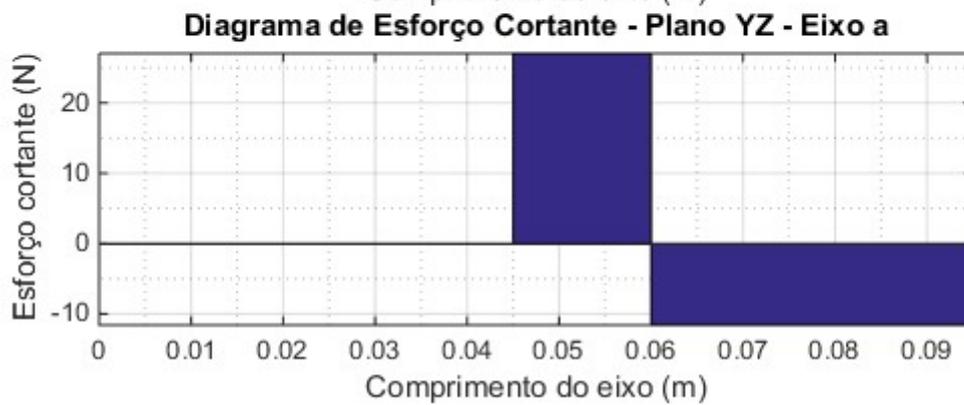
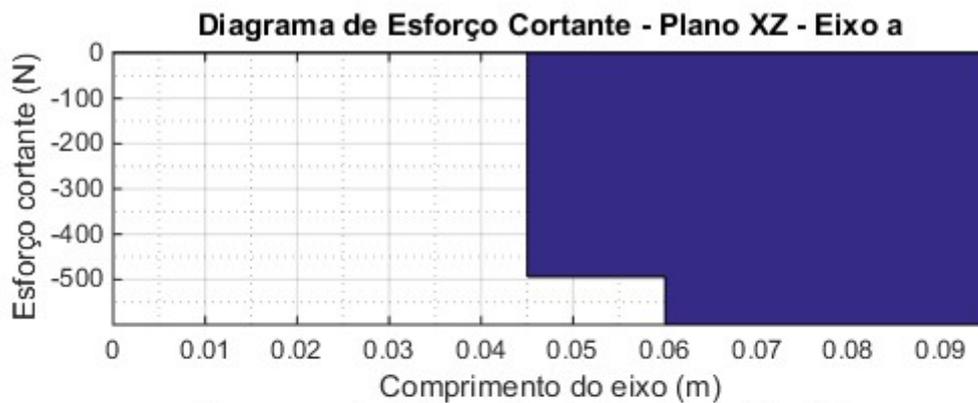


Figura 62 – Diagrama de esforço cortante do eixo a.

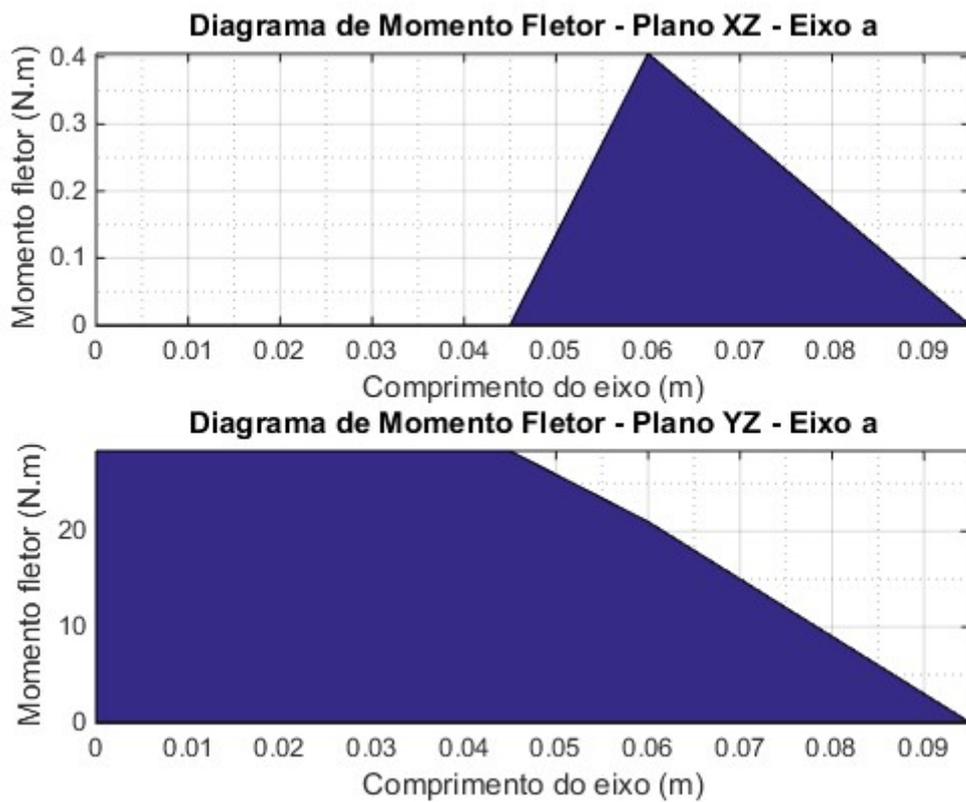


Figura 63 – Diagramas de momento fletor do eixo a.

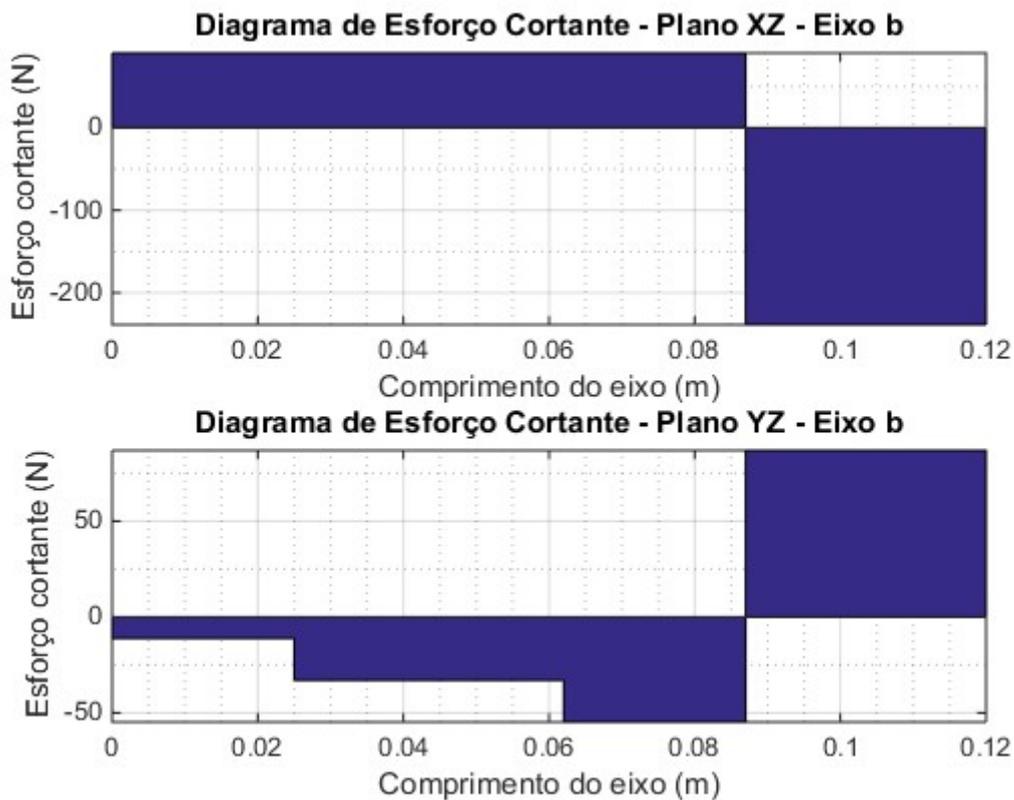


Figura 64 – Diagrama de esforço cortante do eixo b.

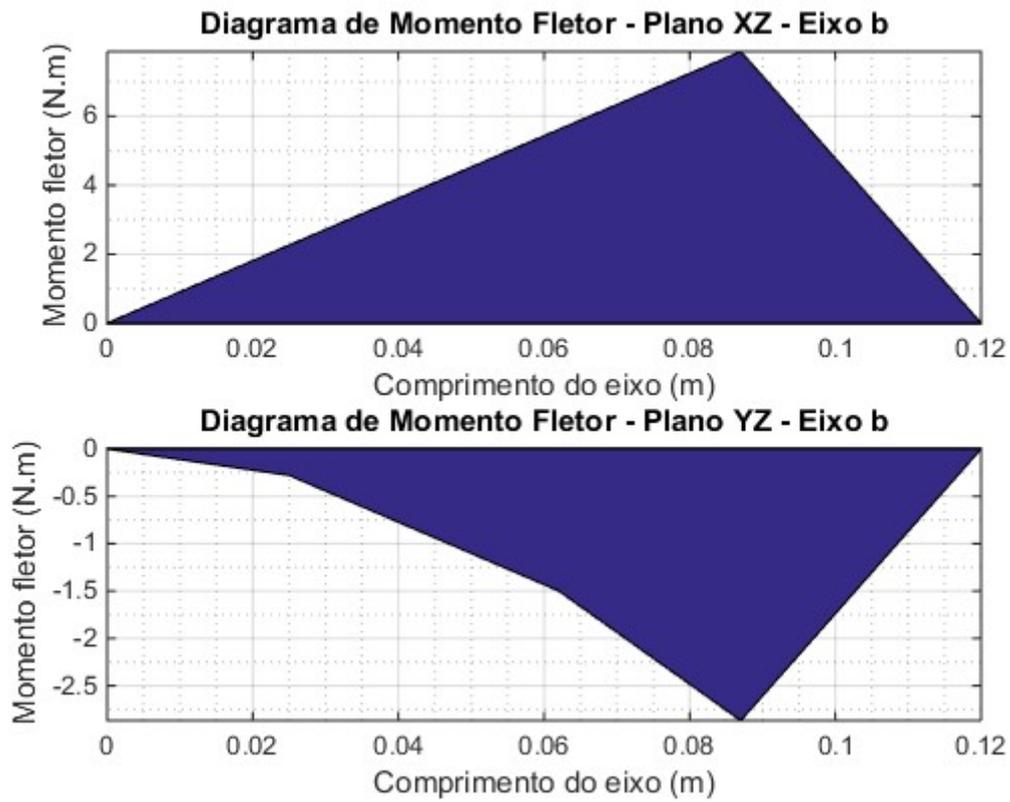


Figura 65 – Diagrama de momento fletor do eixo b.

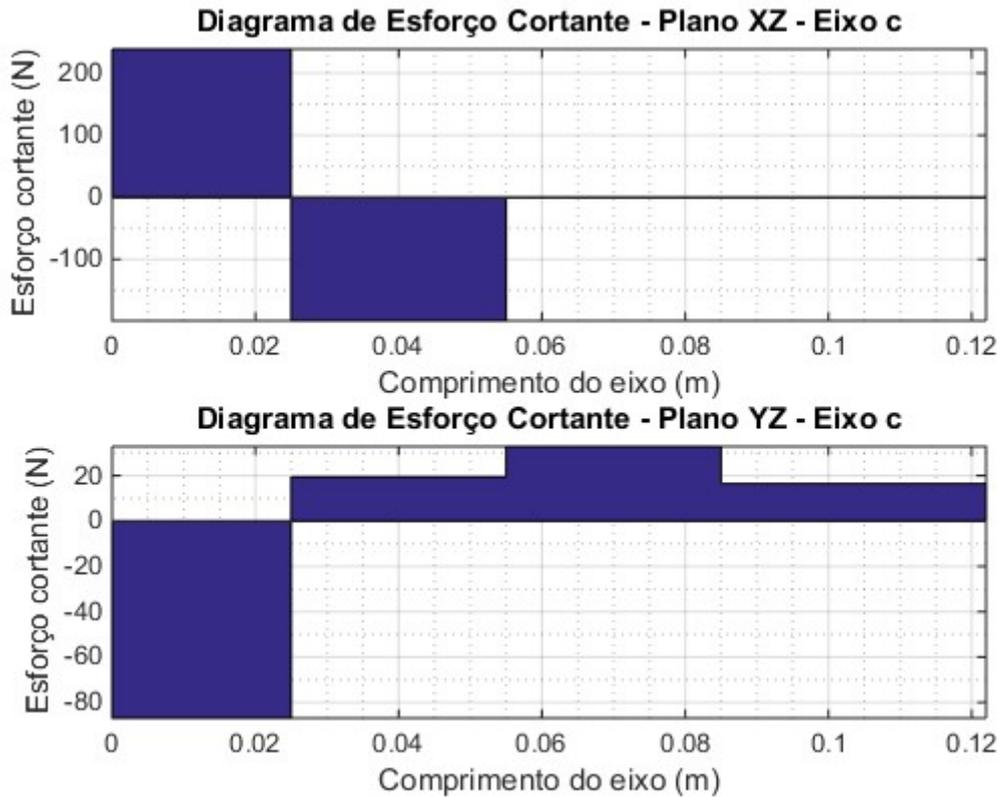


Figura 66 – Diagrama de esforço cortante do eixo c.

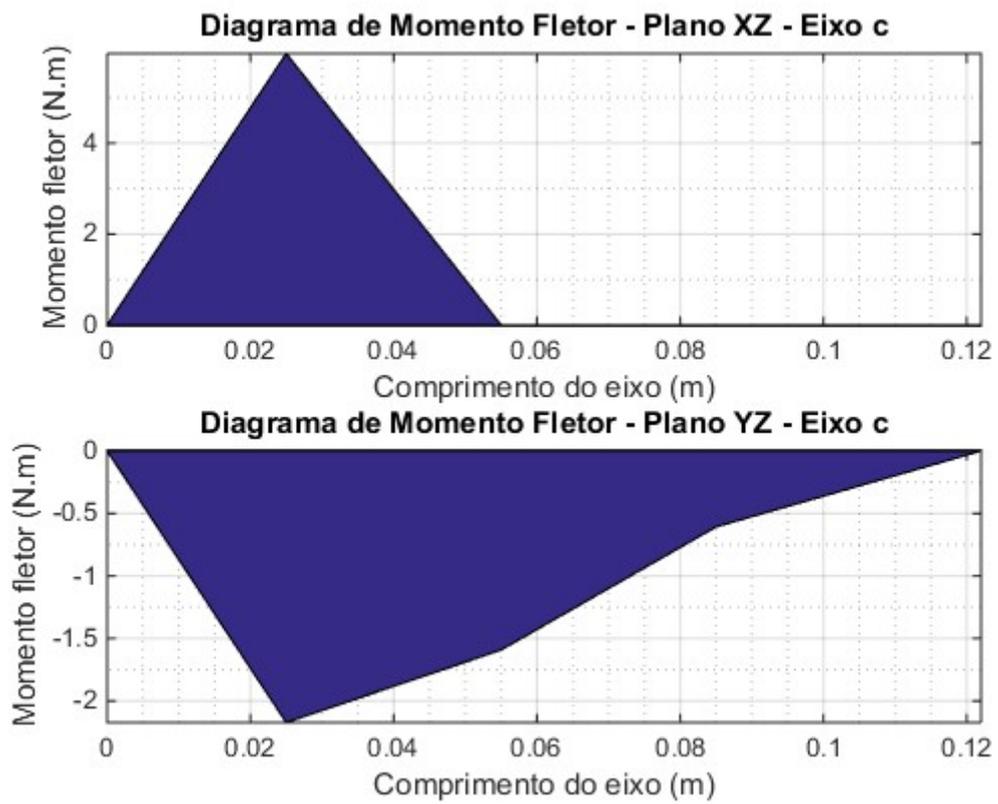


Figura 67 – Diagrama de momento fletor do eixo c.

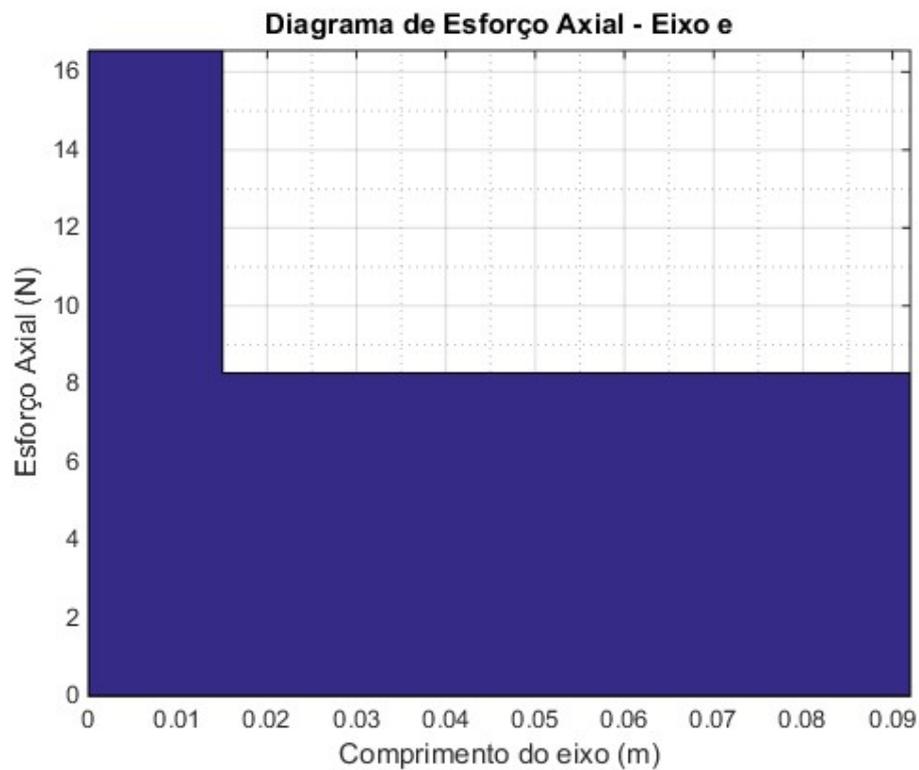


Figura 68 – Diagrama de esforço axial do eixo e.

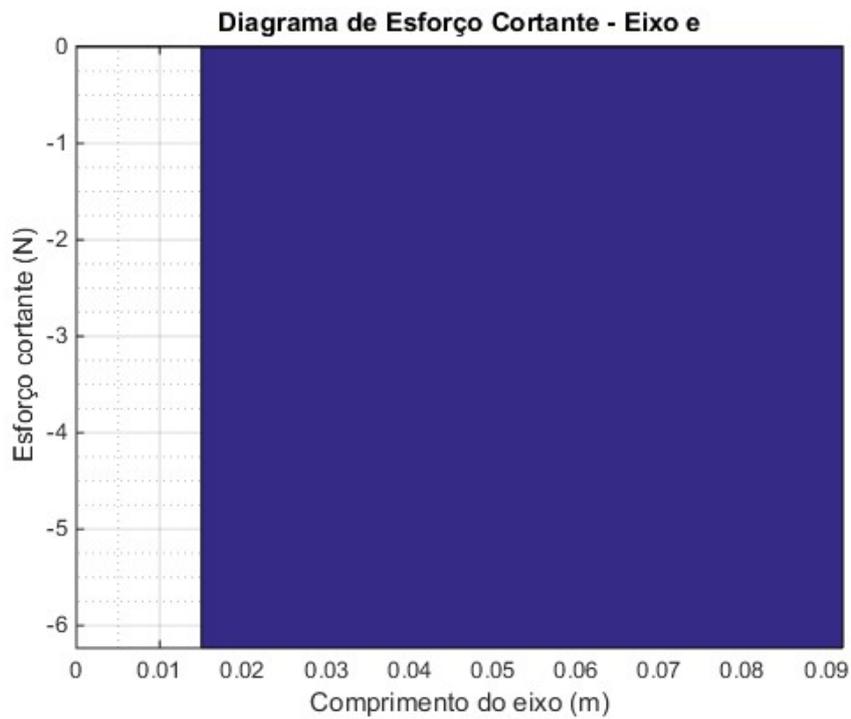


Figura 69 – Diagrama de esforço cortante do eixo e

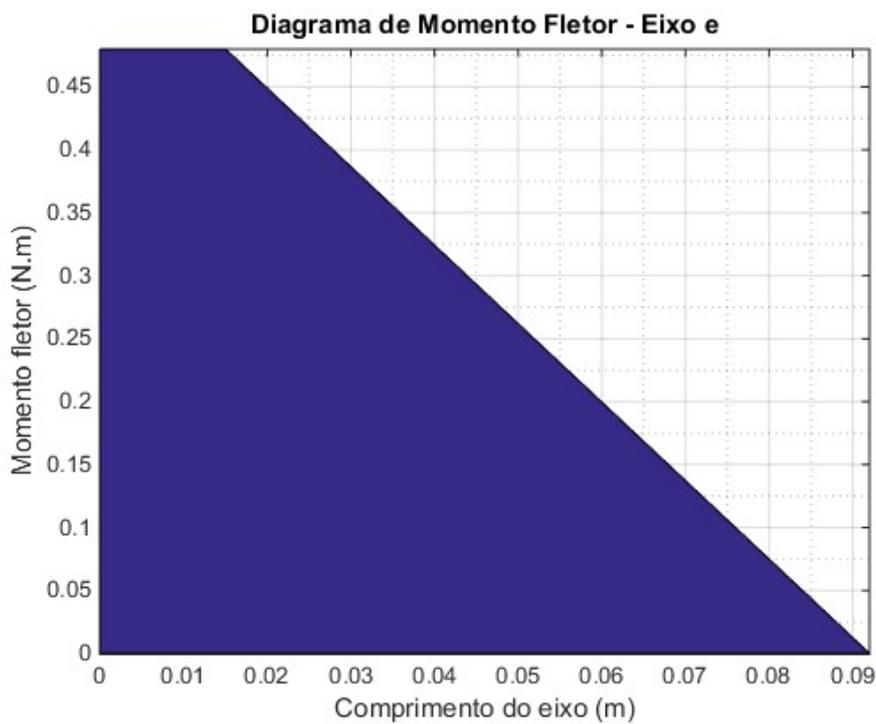


Figura 70 – Diagrama de momento fletor do eixo e.

Para realizar o dimensionamento contra escoamento (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016), utiliza-se a equação para encontrar o diâmetro mínimo para evitar a falha, que considera o critério de falha de von Mises, dada por:

$$d = \left[\frac{16n(4M^2 + 3T^2)}{\pi S_y} \right]^{1/3} \quad (4-62)$$

Em que M_e é o momento alternado no eixo em [N.m], T é o torque no eixo em [N.m], n é o fator de segurança e, por fim, S_y que é o limite de escoamento do material do eixo em [Pa].

Para o dimensionamento contra fadiga, carregamento cíclico, considerou-se o envelope de falha de Goodman e, ainda, considerou-se o caso de fadiga multiaxial simples, ou seja, flexão alternada e torção média. Assim, o mínimo diâmetro necessário para evitar a falha (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016) é dado por:

$$d = \left[\frac{16n}{\pi} \left(2 \frac{K_f M_a}{S_e} + \sqrt{3 \frac{K_{fs} T_m}{S_{ut}}} \right) \right]^{1/3} \quad (4-63)$$

Em que S_e é o limite de resistência à fadiga em [Pa], K_f e K_{fs} são fatores de concentração de tensão, n é o fator de segurança e, por fim, S_{ut} é o limite de resistência à tração em [Pa].

Vale destacar que para obter o limite de resistência à fadiga é preciso determinar os fatores de Marin para corrigir o limite de resistência a fadiga teórico S_e' . Algum desses fatores dependem do diâmetro e, portanto, uma rotina iterativa numérica foi desenvolvida para tal, a qual se encontra no Apêndice VI. Para encontrar esses valores consultou-se a referência (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (4-64)$$

Em que k_a é o fator de acabamento superficial, k_b é o fator de tamanho, k_c é o fator de carregamento, k_d é o fator de temperatura, k_e é o fator de confiabilidade e k_f é o fator de efeitos variados.

- Fator de acabamento superficial (k_a):

É o fator de modificação que está associado à qualidade do acabamento superficial da peça e da resistência à tração do material que a compõe. A forma quantitativa de se obter este fator é dada por:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (4-65)$$

Em que S_{ut} é a resistência à tração mínima e a e b são parâmetros tabelados com base no tipo de acabamento superficial. No caso do projeto, por se tratar de um eixo laminado a frio, tem-se a igual a 4,51 e b igual a -0,265 (G. Budynas & Keith Nisbett, 2016). Assim, k_a é igual a 0,8172.

- Fator de tamanho (k_b):

É dado pelo seguinte conjunto de equações:

$$k_b = \begin{cases} (1,24d)^{-0,107}, & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157}, & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (4-66)$$

Assim, o k_b utilizado foi de 0,9479.

- Fator de carregamento (k_c):

É o fator que se modifica conforme o tipo de carregamento predominante no eixo, se é flexão, axial ou de torção. Sendo dado por:

$$k_c = \begin{cases} 1,00 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção} \end{cases} \quad (4-67)$$

No caso dos eixos do robô, o carregamento predominante é o de flexão e, portanto, k_c foi considerado unitário.

- Fator de temperatura (k_d):

É o fator utilizado para considerar os efeitos de temperaturas extremas, acima de 250°C. Como o robô projetado não vai operar acima desse limiar, considera-se k_d igual a 1.

- Fator de confiabilidade (k_e):

Neste projeto se considera uma confiabilidade de 95%, assim, k_e é igual a 0,8680.

- Fator de efeitos variados (k_f):

É o fator que leva em consideração todos os outros efeitos que causam a redução no limite de resistência, como por exemplo as tensões residuais e corrosão. Considerou-se k_f igual a 1.

No caso do dimensionamento contra deflexão por flexão, adota-se uma restrição geométrica importante nos mancais. Nestes a inclinação de uma linha de centro do eixo com respeito a linha de centro do anel externo do mancal não pode superar 0,0087 rad para mancais de esferas (Henriques, 2017). Considera-se no projeto, o eixo como sendo um eixo uniforme, uma vez que isso simplifica o cálculo das deflexões e inclinações de interesse. Além disso, os cálculos serão efetuados separadamente para os dois planos que contém as componentes das forças atuantes e, posteriormente, serão combinados vetorialmente – método da superposição –.

Para o eixo a, foram sobrepostos (Juvinal, 2013) o caso de uma viga biapoiada com carga concentrada em uma seção qualquer e o caso de uma viga biapoiada com momento aplicado na extremidade externa para o plano YZ e somente o caso de viga biapoiada com carga concentrada em uma seção qualquer para o plano XZ. Já para o eixo b, foram sobrepostos para o plano YZ o caso de uma viga biapoiada com carga concentrada em uma seção qualquer e o caso de uma viga biapoiada com carga concentrada na extremidade externa e somente o caso de viga biapoiada com carga concentrada na extremidade externa para o plano XZ. Já para o eixo c, o caso de viga biapoiada com carga concentrada na extremidade externa foi considerada tanto para o plano XZ quanto para o plano YZ. Por

fim, para o eixo e se considerou somente o caso de viga biapoada com momento aplicado na extremidade externa para o plano XZ. As Figs. (71), (72) e (73) ilustram os casos utilizados:

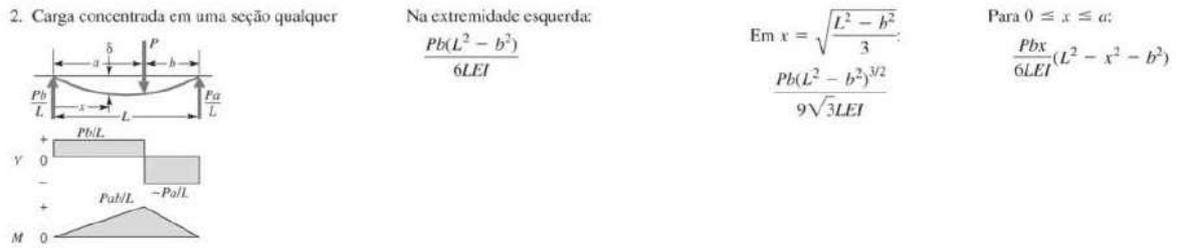


Figura 71 - Viga biapoada com carga concentrada em uma seção qualquer (Juvinall, 2013).

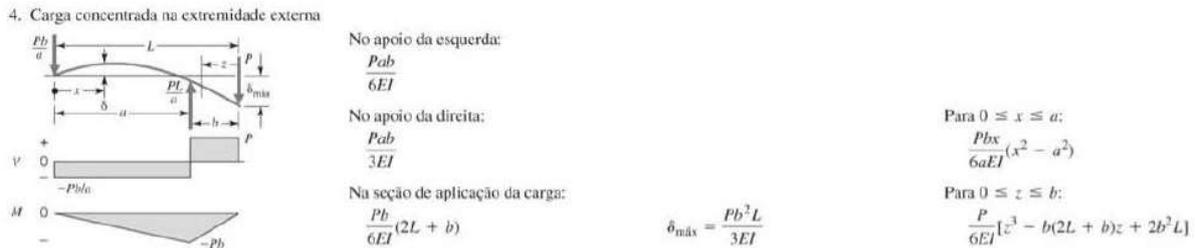


Figura 72 - Viga biapoada com carga concentrada na extremidade externa (Juvinall, 2013).

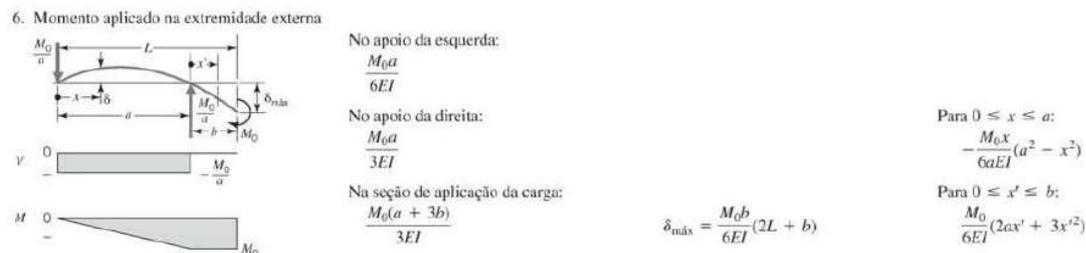


Figura 73 - Viga biapoada com momento aplicado na extremidade externa (Juvinall, 2013).

Para a análise da deflexão por torção, tem-se uma restrição geométrica importante, que é a deformação admissível por metro linear. Considerou-se (Henriques, 2017) uma deformação admissível de 3 graus por metro linear, uma vez que é o rotineiro para árvores de máquinas. Assim, para o cálculo do diâmetro mínimo necessário para evitar esse modo de falha, tem-se:

$$d = \sqrt[4]{583,6TL/G\theta} \tag{4-68}$$

Em que, θ é igual a $3L/1000^\circ$ e L é o comprimento do eixo em mm.

A análise de velocidades críticas não foi realizada uma vez que os eixos do manipulador operam a baixas rotações e essa análise é interessante para eixos a altas rotações (Henriques, 2017).

Todo esse procedimento de projeto de eixos foi implementado em um programa em *MATLAB*, que se encontra no Apêndice VI. Esta rotina implementada forneceu o diâmetro mínimo necessário, já incluído o fator de segurança do projeto, que garante que nenhum modo de falha acontecerá, conforme Tab. (22). Esta tabela contém, ainda, o diâmetro a ser utilizado para cada eixo, o qual foi escolhido logo acima do calculado para ser comprado comercialmente e para facilitar na seleção dos rolamentos.

Tabela 22 - Diâmetros dos eixos mínimo para evitar falha estática, por fadiga, por deflexão por flexão e por deflexão por torção.

| Eixo | Diâmetro para evitar falha estática (mm) | Diâmetro para evitar falha por fadiga (mm) | Diâmetro para evitar falha por deflexão por flexão (mm) | Diâmetro para evitar falha por deflexão por torção (mm) | Diâmetro mínimo da seção (mm) | Diâmetro a ser utilizado da seção (mm) |
|------|--|--|---|---|-------------------------------|--|
| a | 9,16 | 13,59 | 8,01 | 8,26 | 13,59 | 15 |
| b | 6,07 | 8,85 | 8,00 | 8,26 | 8,85 | 10 |
| c | 5,56 | 8,14 | 9,87 | 8,26 | 9,87 | 10 |
| e | 2,57 | 3,42 | 3,09 | 5,91 | 5,91 | 8 |

4.8 DIMENSIONAMENTO DAS CHAVETAS

Chavetas são os elementos mecânicos mais comuns utilizados para transmitir torque do eixo ao elemento que este suporta (Henriques, 2017). Dentre os diversos tipos de chavetas existentes, optou-se pelas chavetas paralelas, devido a simplicidade geométrica, cuja norma aplicável é a ABNT NBR 6375 (DIN 6885). A Fig. (74) apresenta as dimensões da chaveta do tipo paralela:

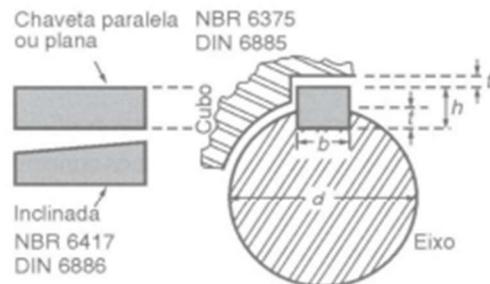


Figura 74 - Dimensões chaveta paralela (ABNT, 1992)

Consultando a NBR 6375, selecionou-se para os eixos do motor de passo NEMA 23 da base e para os eixos a, b e c as larguras (b), as alturas (h) e o valor (t) com base no diâmetro do eixo. Em seguida, considerando os modos de falha por esmagamento e por cisalhamento, calculou-se o comprimento necessário da chaveta. Para tanto, definiu-se o material da chaveta como sendo o mesmo que o material do eixo, aço AISI 1045 laminado a frio. Para o cálculo do comprimento necessário para não haver falha por cisalhamento (Henriques, 2017), fez-se:

$$l = \frac{2Tn}{0,577dS_y t} \quad (4-69)$$

Já para o cálculo do comprimento necessário para não haver falha por esmagamento (Henriques, 2017), fez-se:

$$l = \frac{4Tn}{dS_y h} \quad (4-70)$$

O cálculo das chavetas foi implementado em *MATLAB* no mesmo programa do projeto de eixos, que se encontra no Apêndice VI. Os resultados encontrados estão dados pela Tab. (23):

Tabela 23 - Dimensões das chavetas dimensionadas.

| Chaveta | b (mm) | h (mm) | t (mm) | l calculado (mm) | l utilizado (mm) |
|-----------------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|
| Eixo motor de passo NEMA 23 | 2 | 2 | 1,2 | 0,42 | 4 |
| Eixo a | 5 | 5 | 3 | 0,49 | 4 |
| Eixo b | 4 | 4 | 2,5 | 0,77 | 4 |
| Eixo c | 4 | 4 | 2,5 | 0,69 | 4 |

O comprimento (l) utilizado foi feito selecionando o menor comprimento padronizado segundo a NBR 6375 que fosse maior ao calculado.

4.9 SELEÇÃO DE ROLAMENTOS

Para o manipulador projetado, optou-se pela utilização de mancais de rolamento flangeado de uma carreira de esferas, uma vez que estes podem suportar cargas combinadas radial e axial em ambos sentidos, além de que são de baixo custo comparativamente com outros tipos e, ainda, são fáceis de se encontrar comercialmente.

Para a seleção dos rolamentos, levou-se em consideração o diâmetro do eixo, o espaço disponível axial e radialmente na modelagem em 3D do robô, as cargas atuantes, a disposição dos rolamentos nas juntas, a disponibilidade e o custo.

O manipulador apresenta 1 par de rolamentos para o diâmetro do eixo de 15 mm, 3 pares de rolamento para o diâmetro de eixo de 10 mm e, ainda, 1 par de rolamento para o diâmetro de eixo de 8 mm. Todos esses pares de rolamentos são do tipo KFL 000 disponíveis nas referências (PTI, 2019) e (ASAHI, 2019) e no Anexo III. A Tab. (24) reúne os rolamentos selecionados:

Tabela 24 - Rolamentos selecionados.

| Eixo | Especificação do Rolamento | Diâmetro do eixo (mm) |
|------|----------------------------|-----------------------|
| a | KFL 002 | 15 |
| b | KFL 000 | 10 |
| c | KFL 000 | 10 |
| e | KFL 08 | 8 |

A Tab. (21) apresenta todas as reações que atuam sobre os mancais. Dela, nota-se que o mancal mais exigido é o mancal A, do eixo a. Será feita a análise deste rolamento, por ser o mais crítico, e será analisado se ele está dentro dos limites de operação. Caso atenda, considera-se que os demais, de forma análoga, também satisfarão as condições.

Para a vida nominal, L_{10} , considerou-se (Henriques, 2017) 30000 horas de trabalho, o que corresponde ao caso de máquinas totalmente utilizadas em 8 horas de trabalho diárias. Em seguida, por meio da Eq. (4-71), corrigiu-se a vida nominal considerando a confiabilidade, aprimoramentos no material e a condição de uso:

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad (4-71)$$

Em que, a_1 é o coeficiente de confiabilidade, a_2 o coeficiente de material e a_3 o coeficiente das condições de uso.

Para a confiabilidade de 95%, tem-se a_1 igual a 0,62. Já os fatores a_2 e a_3 foram considerados como iguais a 1, que corresponde ao caso de condições normais de operação. Assim, o L_{na} calculado foi de 18600 horas.

Para encontrar a vida em milhões de rotações, utiliza-se a Eq. (4-72):

$$L_{mr} = 60 \times 10^{-6} n L_{na} \quad (4-72)$$

Em que n é a rotação em [rpm]. Desta forma, considerando n igual a 20 rpm, tem-se uma vida de 22,32 milhões de rotações.

Para a relação entre a vida e a carga para rolamento de esferas (Henriques, 2017), tem-se:

$$L_{mr} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (4-73)$$

Em que C é a capacidade de carga básica, tabelada no catálogo do fabricante e P é a carga equivalente no rolamento calculada corrigida.

Assim a capacidade de carga básica mínima, considerando o valor de P corrigido como sendo 10% maior que a reação radial no mancal A, deve ser igual a 1,86 kN. Consultando os catálogos do Anexo III, tem-se que a capacidade de carga do rolamento é de 2 kN, o que é superior ao mínimo necessário.

Por fim, recalcula-se com o valor da capacidade de carga de 2 kN qual é a vida real em milhões de rotação do rolamento, que é de 27,85 milhões de rotações.

4.10 PROJETO CONTRA DEFLEXÃO DO MANIPULADOR

O projeto do manipulador contra deflexão é de fundamental importância para garantir a validade das análises cinemática e dinâmica desenvolvidas. Assim sendo, o robô precisa ser capaz de suportar as cargas atuantes sobre os elos, juntas e, também, suportar a carga devido a própria gravidade, seu peso. Para tanto, considerou-se o manipulador esticado na horizontal, ou seja, na posição em que temos os ângulos de junta iguais a zero Fig. (47) e, também, se considerou o manipulador como uma viga engastada de comprimento igual ao comprimento total do robô, com seção de coroa circular e de PVC.

Para obter a localização do centro de massa e a massa total do robô, utilizou-se o recurso de cálculo das propriedades de massa do *software SOLIDWORKS*, o qual forneceu:

$$P_{CM} = \begin{pmatrix} 0,0217 \\ 0,3936 \\ 0,1520 \end{pmatrix} m \quad (4-74)$$

$$m_{total} = 5,29 \text{ kg} \quad (4-75)$$

Além disso, para calcular a deflexão da linha elástica que ocorre com as cargas atuantes, considerou-se a superposição dos casos de uma viga engastada com carga concentrada na extremidade (*payload*) e

o caso de uma viga engastada com carga concentrada em uma seção qualquer (peso próprio do robô) (Juvinal, 2013), a Fig. (75) ilustra tais casos:

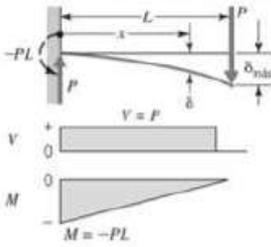
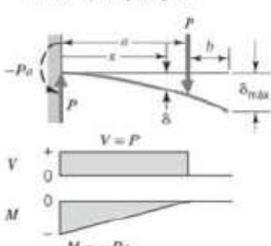
| | Inclinação na Extremidade Livre | Deslocamento Máximo | Deslocamento δ em um Ponto x Qualquer |
|---|---------------------------------|--|---|
| <p>1. Carga concentrada na extremidade</p>  | $\theta = \frac{PL^2}{2EI}$ | $\delta_{\text{máx}} = \frac{PL^3}{3EI}$ | $\delta = \frac{Px^2}{6EI}(3L - x)$ |
| <p>2. Carga concentrada em uma seção qualquer</p>  | $\theta = \frac{Pa^2}{2EI}$ | $\delta_{\text{máx}} = \frac{Pa^2}{6EI}(3L - a)$ | <p>Para $0 \leq x \leq a$:</p> $\delta = \frac{Px^2}{6EI}(3a - x)$ <p>Para $a \leq x \leq L$:</p> $\delta = \frac{Pa^2}{6EI}(3x - a)$ |

Figura 75 - Viga engastada com carga concentrada na extremidade e com carga concentrada em uma seção qualquer (Juvinal, 2013).

Assim, para x igual a L , tem-se um deslocamento máximo de 24,9 mm na extremidade da viga, com o carregamento máximo atuando. Considerando, também, o fator de segurança do projeto esse valor chega a 33,9 mm. Assim, estabeleceu-se como limite de deflexão permitido para o manipulador o valor de 35 mm, uma vez que para as atividades que o robô executa essa deflexão é aceitável.

Por fim, estudou-se como a deflexão se comporta com a variação do *payload* de 0 até 1,2 kg, a Fig. (76) ilustra essa relação:

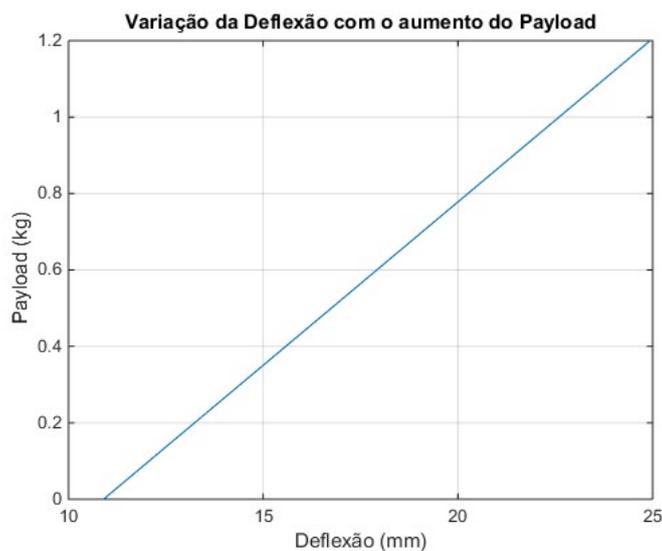


Figura 76 - Variação da deflexão com o aumento do *payload*.

4.11 DESIGN E MODELAGEM DO ROBÔ

O design do robô foi realizado de forma a garantir efetividade, segurança e, principalmente, uma redução de custos, seja pela fabricação das peças modeladas seja pela redução do número ou redução da variabilidade dos tipos de componentes utilizados na montagem do robô. Esta forma de projetar já levando em consideração a fabricação dos componentes e, conseqüentemente, a redução de custos é chamada de *Design for Manufacturing* (DFM) e *Design for Assembly* (DFA) (Greenlee, 2002). As melhores práticas para esse modo de projetar são:

- Reduzir do número total de componentes;
- Desenvolver o design do sistema mecânico de forma modular, ou seja, que para testar não seja necessário montar todos componentes de uma só vez;
- Padronizar componentes, diminuindo o número de peças diferentes entre si, ou seja, a variabilidade;
- Projetar componentes que sejam intercambiáveis, ou seja, multifuncionais. Por exemplo, dois elos de mesma geometria e dimensões;
- Facilitar a fabricação, evitando o uso sem necessidade de tolerâncias, acabamentos superficiais complicados, processos de fabricação caros;
- Conhecer os equipamentos, instrumentos e ferramentas disponíveis para fabricação dos componentes.

Assim, modelaram-se no *software SOLIDWORKS* todos os componentes a serem fabricados bem como os componentes selecionados comercialmente, conforme Fig. (77):

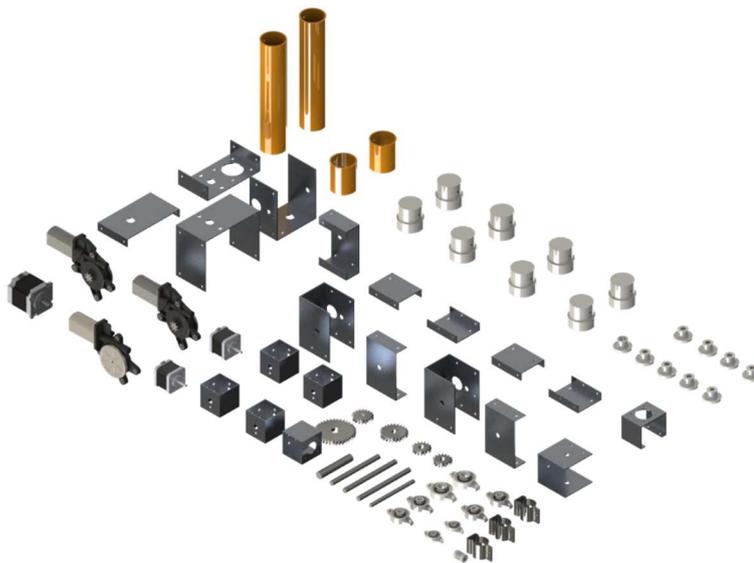


Figura 77 - Modelagem em 3D de todos os componentes do robô, a exceção dos parafusos, porcas e arruelas.

A Fig. (78) ilustra o robô montado, as Figs. (79), (80) e (81) apresentam as configurações de juntas (4-8) e, por fim, a Fig. (82) apresenta o robô montado a cadeira de rodas:

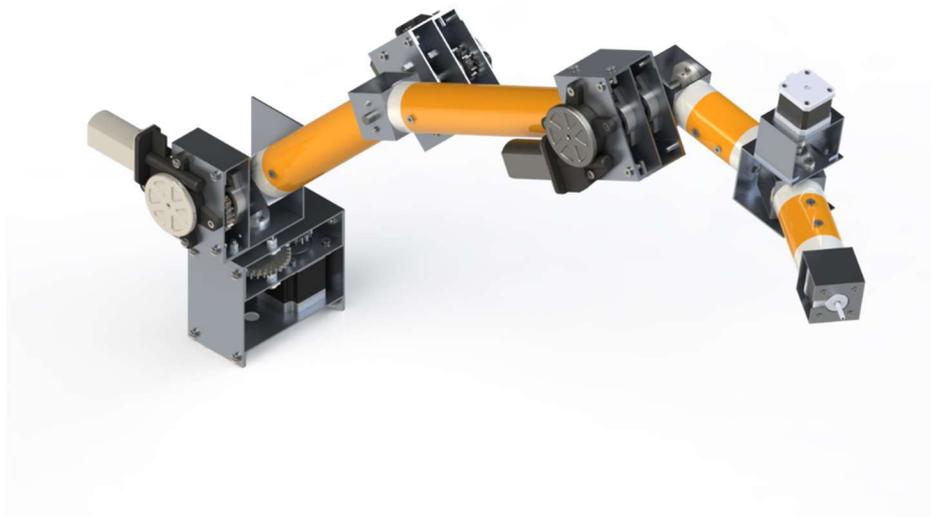


Figura 78 - Modelagem do robô montado.

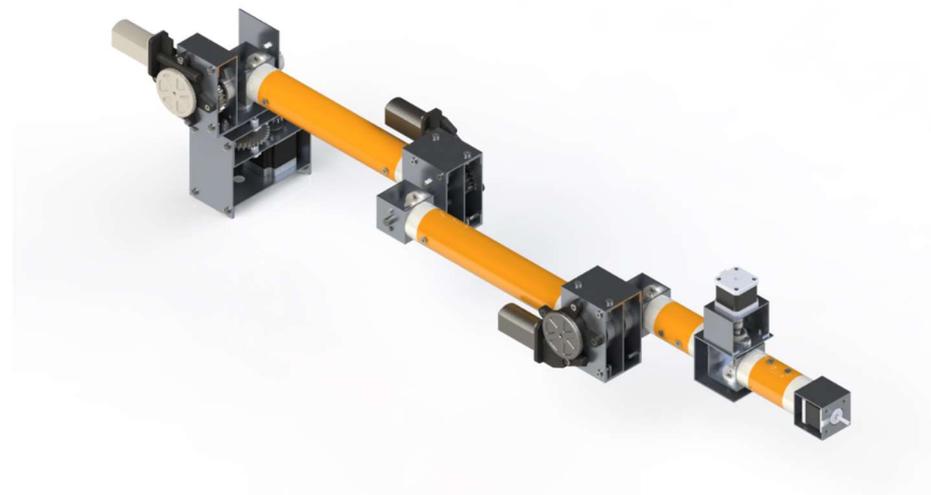


Figura 79 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração q_z .



Figura 80 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração q_r .

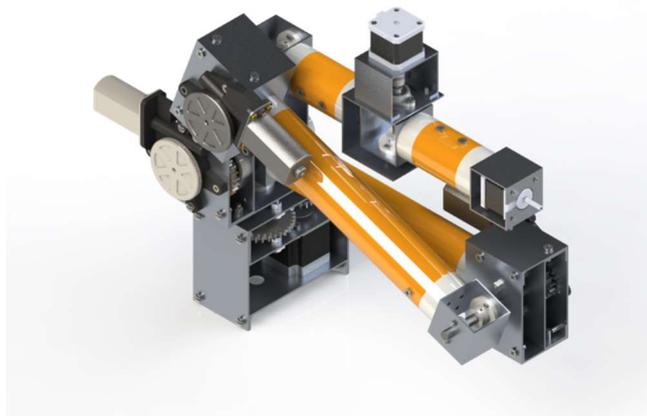


Figura 81 - Representação do robô no SOLIDWORKS na configuração q_g .



Figura 82 - Modelagem do robô montado na cadeira de rodas.

A Tab. (25) reúne todos os componentes bem como as quantidades de cada um deles.

Tabela 25 - Lista de componentes do Robô.

| Nome do Componente | Quantidade |
|--|------------|
| Abraçadeira D 3/4" | 2 |
| Acoplamento Flexível MSTS – 5 mm para 8 mm | 1 |
| Bucha 8 mm | 2 |
| Bucha 10 mm | 6 |
| Bucha 15 mm | 1 |
| Eixo a | 1 |
| Eixo b | 1 |
| Eixo c | 2 |
| Eixo e | 1 |
| Elo 1 | 2 |
| Elo 3 | 2 |
| Base parte 1 | 1 |
| Base parte 2 | 1 |
| Base parte 3 | 1 |
| Base parte 4 | 1 |
| Base parte 5 | 1 |
| Junta quadrada | 4 |
| Junta 3 parte 1 | 2 |
| Junta 3 parte 2 | 2 |
| Junta 3 parte 3 | 2 |
| Junta 3 parte 4 | 2 |
| Junta 5 parte 1 | 1 |
| Junta 5 parte 2 | 1 |
| Junta 6 | 1 |
| Junta Nylon | 8 |
| Motor Mabuchi LC-578VA | 1 |
| Motor Mabuchi JC-578VA | 2 |
| Motor HT23-397 NEMA23 | 1 |
| Motor 42HS48-1684 NEMA17 | 2 |
| Rolamento KFL Ø8 | 2 |
| Rolamento KFL Ø10 | 6 |
| Rolamento KFL Ø15 | 2 |
| Engrenagem, módulo 2, 18 dentes | 1 |
| Engrenagem, módulo 2, 36 dentes | 1 |
| Engrenagem, módulo 2, 16 dentes | 2 |
| Engrenagem, módulo 2, 24 dentes | 1 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M3 | 16 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M4 | 10 |
| Parafuso allen M5 | 78 |
| Porca allen e Arruela M5 | 30 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M6 | 20 |

4.12 ANÁLISE ESTRUTURAL DA BASE

Para realizar a análise estrutural da base, utilizou-se o *SOLIDWORKS Simulation*, que fornece opções de simulação para análises estáticas lineares, não lineares, de frequência, flambagem, térmica, fadiga, entre outros. No presente projeto, realizou-se com o *Simulation* a análise estática da base a fim de estudar os deslocamentos presentes no caso em que o robô se encontra carregado com seu *payload* máximo.

Este *software* utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF), que consiste em um método numérico que divide o modelo em muitas partes pequenas de formas simples, os elementos, com o intuito de dividir um problema complexo em uma série de problemas mais simples que são resolvidos simultaneamente (SOLIDWORKS, 2019). Tais elementos compartilham pontos comuns, os nós, os quais que com o conhecimento de todas as cargas e apoios atuantes têm seu comportamento determinado. Assim, a resposta em um ponto qualquer de um elemento é obtida pela interpolação das respostas dos nós do elemento por meio do cálculo simultâneo do conjunto de equações algébricas que calculam as incógnitas do problema.

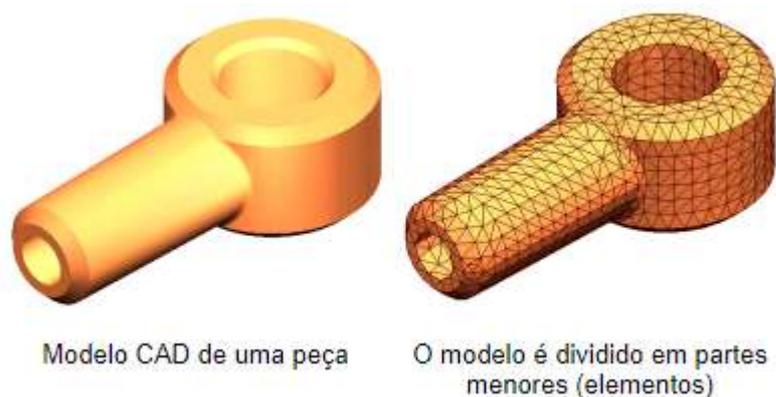


Figura 83 - Malha de um componente para o MEF (SOLIDWORKS, 2019).

Não constitui objetivo do projeto um extenso aprofundamento no MEF, assim, de forma resumida, realizou-se a modelagem dos componentes a serem simulados, definiram-se os materiais de cada peça, estabeleceram-se as condições de contorno e as cargas atuantes, gerou-se a malha e, por fim, realizou-se o estudo estático da base.

A análise estática calcula os deslocamentos, deformações, tensões e forças de reação das cargas aplicadas externamente. Esse tipo de análise pressupõe que as cargas são aplicadas de forma lenta e gradativa (SOLIDWORKS, 2019) e, também, pressupõe que a relação entre as cargas e as respostas induzidas são lineares.

Com essa breve contextualização, realizou-se a simulação, a qual estabeleceu como engastados os furos da peça base parte 3 com as abraçadeiras e considerou-se a presença dos parafusos e porcas que fixam as chapas entre si, conforme Fig. (84):

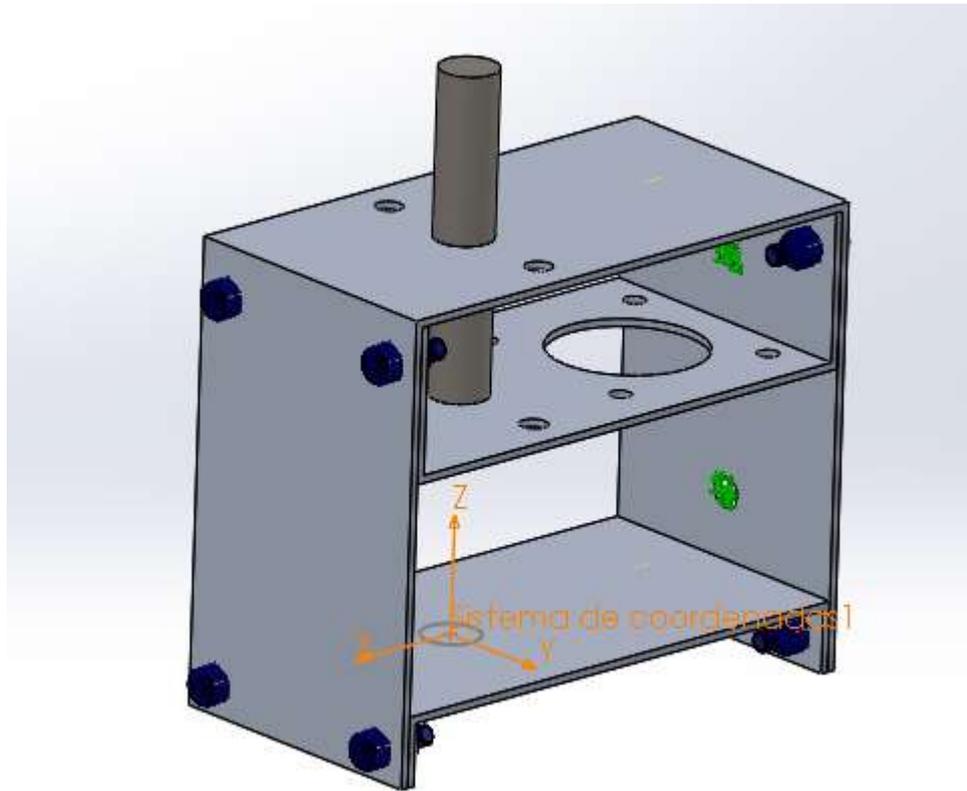


Figura 84 - Condições de contorno: fixação e conectores.

Além disso, aplicou-se, utilizando o recurso de massa remota, a carga decorrente do próprio peso do robô e o *payload* na altura da face superior do eixo a, nas distâncias, respectivamente, do centro de massa e na ponta do eixo da junta 6, conforme Fig. (85):

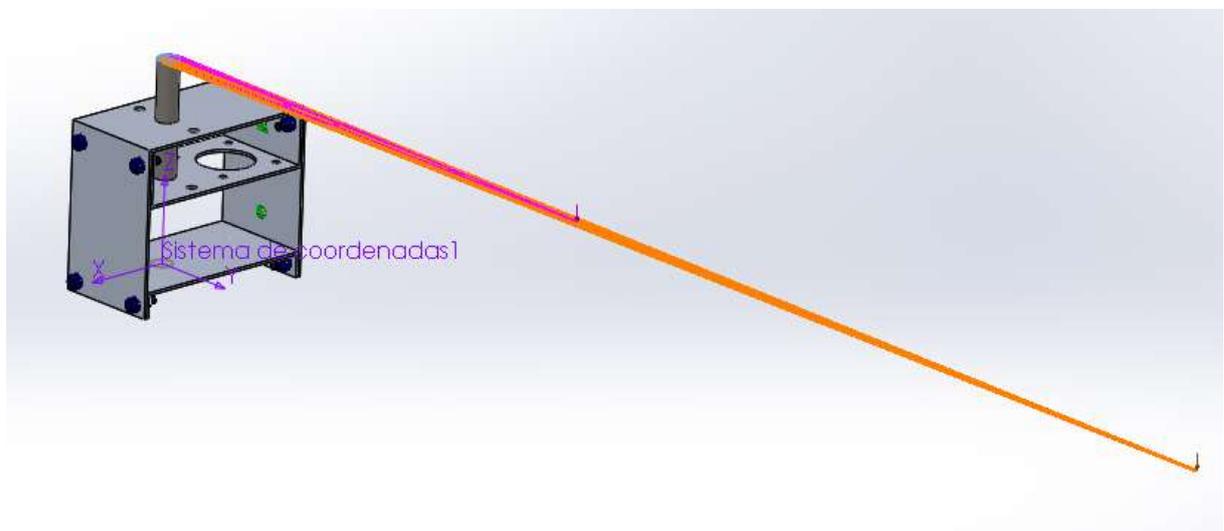


Figura 85 - Condições de contorno: cargas externas.

Por fim, gerou-se a malha automática de elementos sólidos tetraédricos, Fig. (86), e, em seguida, executou-se a análise para extrair os resultados almejados para o deslocamento, Figs. (87) e (88), o qual teve um máximo aproximado de 2 mm, o que considerando os objetivos do projeto está satisfatório.

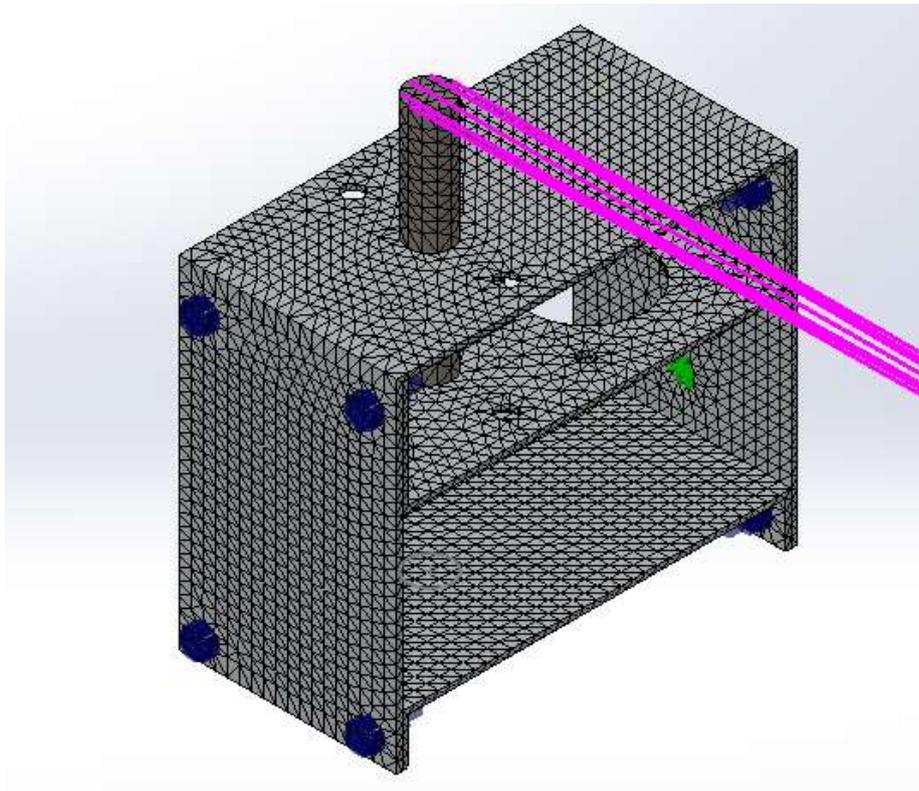


Figura 86 - Malha gerada para a base.

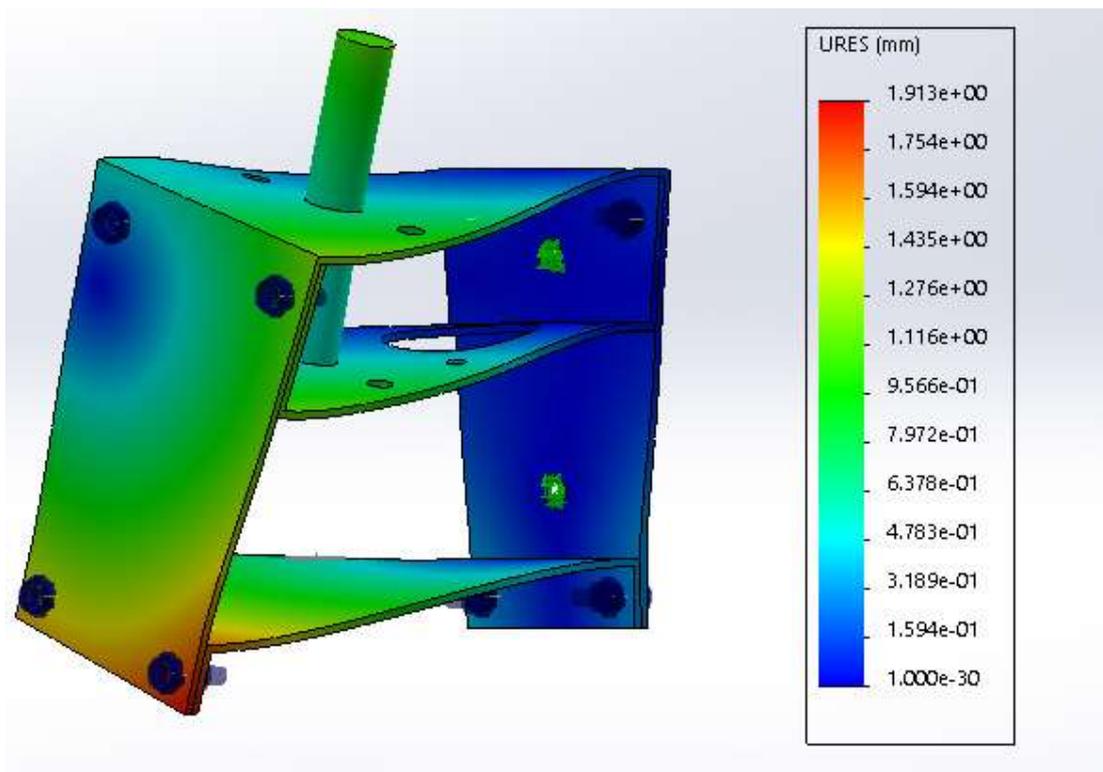


Figura 87 - Resultado da simulação: deslocamento em mm com uma escala de distorção de 20.

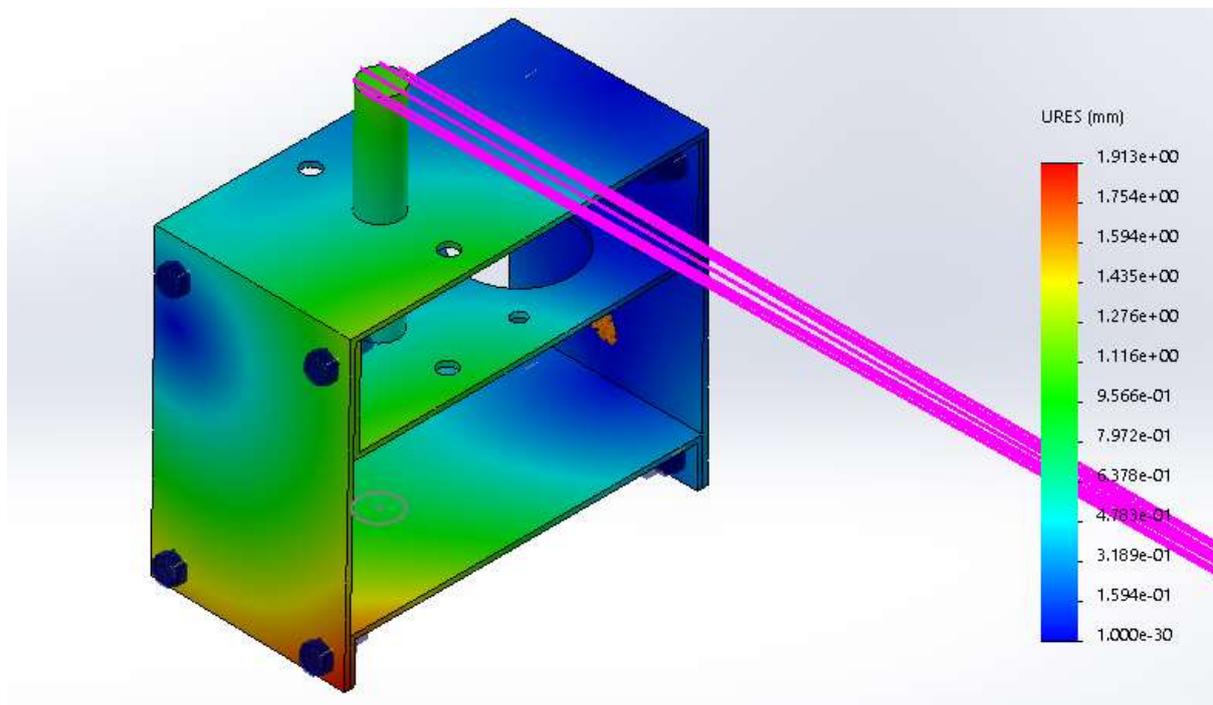


Figura 88 - Resultado da simulação: deslocamento em mm com a escala real de distorção.

5 PROTOTIPAGEM

5.1 MOCKUP

No *design* de produtos costuma-se realizar um *mockup*, que é uma simplificação do modelo desenvolvido, feito com materiais alternativos e mais baratos com o intuito de observar e perceber problemas até então não percebidos no decorrer do projeto, minimizando os problemas na prototipação ou na fabricação final e, ainda, testando a validade do conceito desenvolvido. Assim, um *mockup* representa a forma, a escala e as relações básicas da função do produto desenvolvido.

O *mockup* desenvolvido para o robô projetado, fora e montado na cadeira de rodas, se encontra ilustrado nas Figs. (89) e (90) respectivamente:

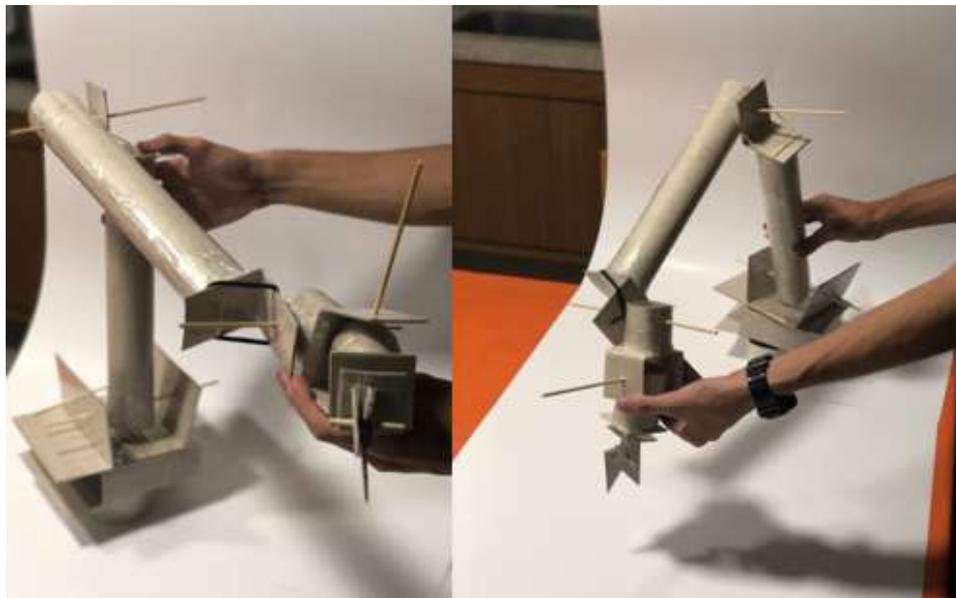


Figura 89 - Mockup montado.



Figura 90 - Mockup montado na cadeira de rodas.

5.2 PROTÓTIPO

No que tange a construção do protótipo dois aspectos são de fundamental importância: a fabricação e a montagem. Para o primeiro aspecto, definiram-se os processos de fabricação, bem como acompanhou-se a sua confecção junto aos técnicos mecânicos responsáveis no laboratório do SG09 e do GRACO na Universidade de Brasília. Para o segundo aspecto, realizou-se um guia de montagem a fim de garantir a correta montagem dos elementos.

Os componentes a serem especificados os processos de fabricação envolvidos, a partir da Tab. (25) são: buchas (de 8, 10 e 15 mm); eixos (a, b, c, e); elos (1 e 3), base (parte 1, 2, 3, 4 e 5); junta quadrada; junta 3 (parte 1, 2, 3 e 4); junta 5 (parte 1 e 2); junta 6, junta nylon e as engrenagens (18, 26, 24 e 16 dentes). Os demais componentes são selecionados e comprados já prontos para a aplicação com as especificações já apresentadas.

As buchas e as juntas de nylon foram produzidas por usinagem de um tarugo de *technyl* no torno do GRACO, Fig. (91), e tiveram seus furos feitos na furadeira de coluna também do GRACO, Fig. (92). Já os eixos e os elos foram comprados já no diâmetro desejado e foram cortados no comprimento determinado na máquina de corte do GRACO, Fig. (93), e seus furos para montagem foram feitos na furadeira de coluna da Fig. (92). De forma análoga aos eixos e aos elos, realizou-se a compra de uma barra de seção quadrada já com a seção determinada e, também no GRACO, com a máquina de corte e furadeira de coluna realizou-se o corte para o comprimento desejado e sua furação para a elaboração da junta quadrada e da junta 6. Já as partes da base e da junta 3 foram realizadas com a máquina de corte de chapas, furadeira de coluna e dobradeira de chapas do SG09, ilustradas, respectivamente, nas Figs. (94), (95) e (96). Por fim, para as engrenagens, utilizou-se uma impressora 3D Anycubic i3 Mega com filamento PLA, ilustrada na Fig. (97).



Figura 91 - Torno do GRACO.



Figura 92 - Furadeira de coluna do GRACO.



Figura 93 - Máquina de corte do GRACO.



Figura 94 - Máquina de corte de chapas do SG09.



Figura 95 - Furadeira de coluna do SG09.



Figura 96 - Dobradeira no SG09

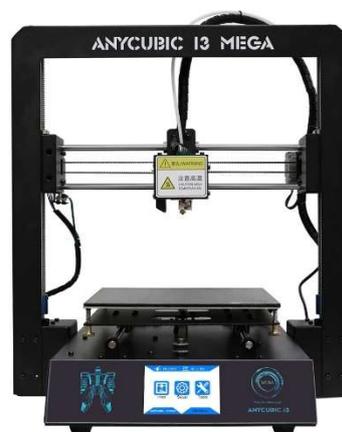


Figura 97 - Impressora 3D com filamento PLA.

Para a correta montagem do robô, estabeleceu-se um guia de montagem de forma a orientar a correta junção dos componentes.

Etapa 1 – Montagem da Base:

Fixa-se o motor HT23-397 NEMA23 à base parte 2 por meio dos parafusos allen, porcas e arruelas M5. Em seguida, fixa-se este subconjunto à base parte 3 e, depois, à base parte 1 utilizando os parafusos allen, porcas e arruelas M5. Fixa-se, ainda, as abraçadeiras na face da base parte 3 e, também, os rolamentos KFL Ø15, um na base parte 2 e o outro na base parte 3, sendo que para os rolamentos o conjunto porca, parafuso e arruela M6 é utilizado. Por fim, posiciona-se a engrenagem de 18 dentes no eixo de saída do motor e, ao inserir o eixo a, insere-se também a engrenagem de 36 dentes, com suas respectivas chavetas. A Fig. (98) ilustra a montagem até aqui:



Figura 98 - Montagem da base parcial.

Continuando a montagem da base, deve-se fixar a base parte 4 ao eixo a por meio da bucha de 15 mm com seus respectivos parafusos e porcas M3. Na base parte 4 monta-se o motor Mabuchi LC-578VA, utilizando os fixadores correspondentes (M5). Na base parte 4, fixa-se ainda a base parte 5 com os fixadores M5. Os rolamentos KFL Ø10 são montados um na base parte 4 e um na base parte 5, com os parafusos e porcas correspondentes (M6). A Fig. (99) ilustra a Etapa 1 completa.

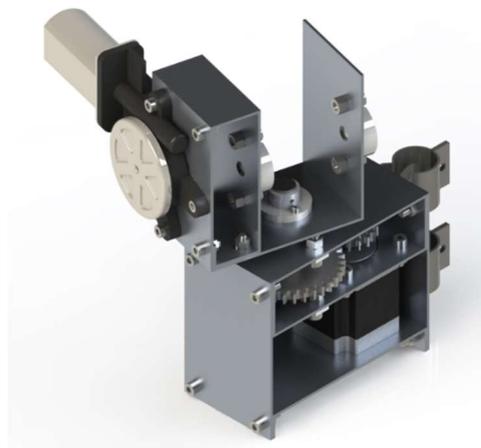


Figura 99 - Montagem da base.

Etapa 2 – Montagem dos elos 1 e 2 completos:

A montagem dos elos 1 e 2 é a mesma, assim se resume em apenas uma etapa as duas montagens. Com a peça Elo 1, insere-se nas suas duas extremidades as juntas de nylon. Em seguida, em uma das extremidades, fixa-se com os parafusos M5 a junta quadrada à junta de nylon e ao elo 1. Na outra extremidade, será montado a junta 3 parte 1 com o mesmo tipo de parafusos. Na junta quadrada, fixa-se duas buchas de 10 mm internamente com os fixadores M3. A Fig. (100) ilustra a montagem parcial do elo 1:

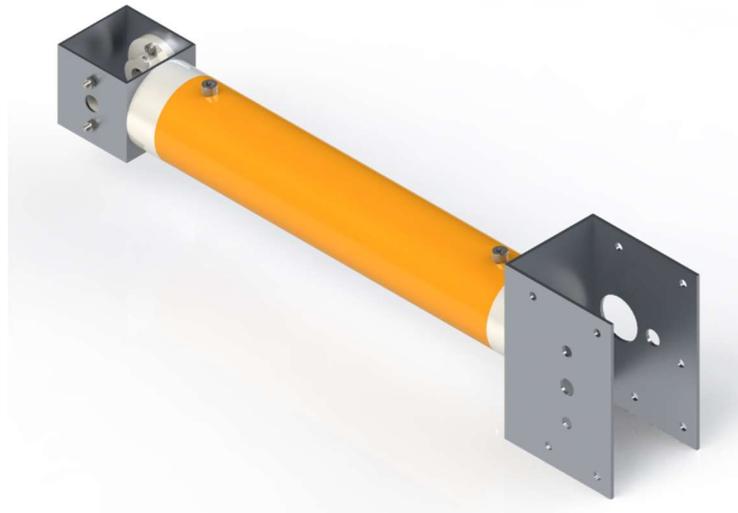


Figura 100 - Montagem parcial do elo 1.

Prosseguindo com a montagem, fixa-se o motor Mabuchi JC-578VA à junta 2 parte 1. Em seguida, monta-se a junta 2 parte 3 à junta 2 parte 1 e, ainda, um rolamento KFL Ø10 em cada uma dessas peças. Por fim, monta-se a junta 2 parte 2 e 4 à junta 2 parte 1 e 3, para que, finalmente, seja possível montar o eixo c e a engrenagem de 16 dentes. A Fig. (101) ilustra a montagem final do elo 1.



Figura 101 - Montagem final do elo 1.

Etapa 3 – Montagem dos elos 3 e 4 completos:

A montagem dos elos 3 e 4 tem alguns passos iguais, são eles: inserção das juntas de nylon nas extremidades dos elos e, também, a fixação de uma junta quadrada em uma extremidade de cada elo com os fixadores M5 e, por fim, as buchas de 10 mm para o caso do elo 3 e buchas de 8 mm para o caso do elo 4. A Fig. (102) ilustra a montagem parcial dos elos 3 e 4:



Figura 102 - Montagem parcial dos elos 3 e 4.

No caso do elo 3, na extremidade oposta à junta quadrada, fixa-se a junta 5 parte 1, na qual são fixados os dois rolamentos KFL Ø8. Em seguida, monta-se a junta 5 parte 2 com os fixadores M4. Neste é montado o motor 42HS48-1684 NEMA17, no qual, por meio do acoplamento flexível monta-se o eixo e. Para o elo 4, na extremidade oposta à junta quadrada, monta-se a junta 6 e nela é montado o outro o motor 42HS48-1684 NEMA17, conforme Fig. (103):

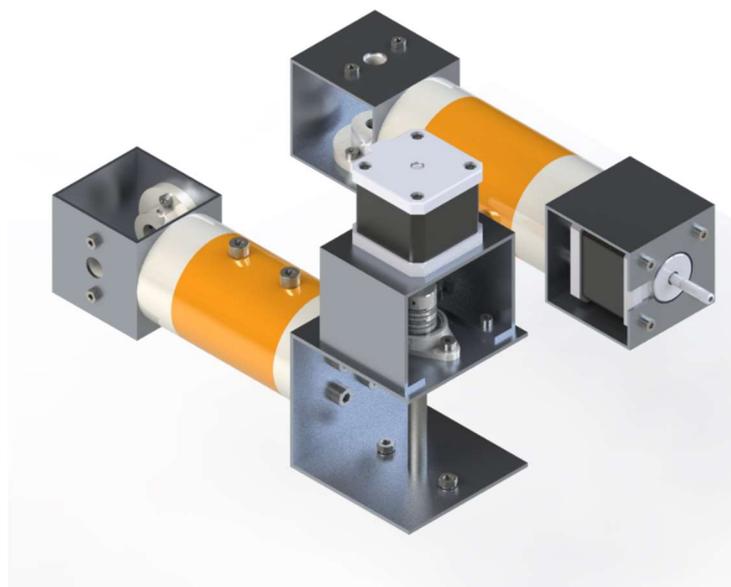


Figura 103 - Montagem final dos elos 3 e 4.

Etapa 4 – Montagem dos elos 1 e 2 completos à base:

Para a montagem do elo 1 completo à base, posiciona-se a engrenagem de 24 dentes e o eixo b, o qual é fixado nas buchas que estão na junta quadrada da extremidade do elo 1. Para o elo 2, o eixo c é fixado às buchas da junta quadrada do elo 2. De modo análogo à montagem do elo 2, fixa-se os eixos d (que é a duplicata do eixo c) na junta quadrada do elo 3 e o eixo e nas buchas da junta quadrada do elo 4, conforme a Fig. (78).

Os desenhos técnicos de cada peça e da montagem final estão no Apêndice VII.

Com isso, conseguiu-se fabricar e montar o protótipo projetado, conforme ilustram as Figs. (104) a (106):



Figura 104 - Montagem do robô no GRACO (1).

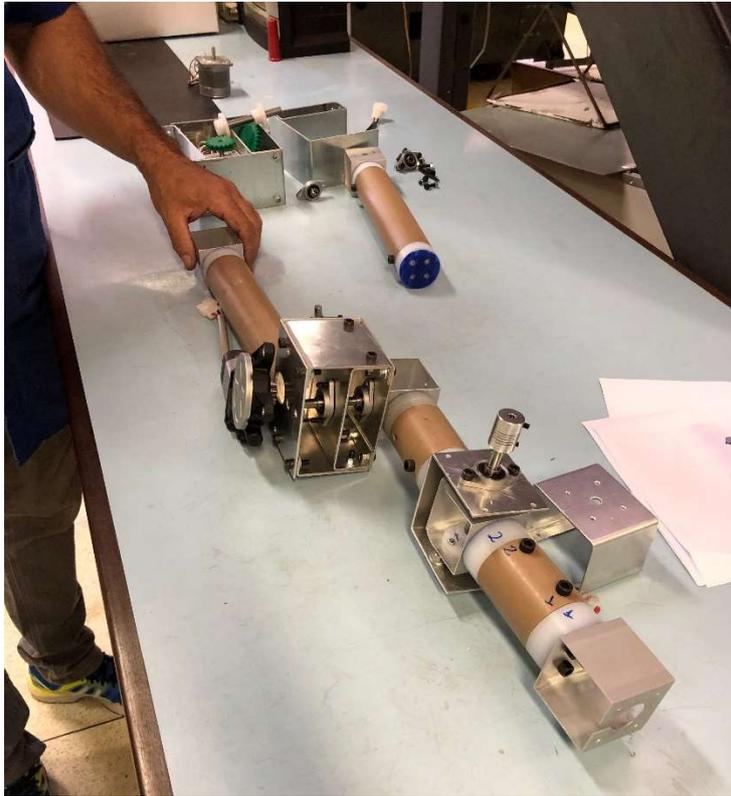


Figura 105 – Montagem do robô no GRACO (2).



Figura 106 – Montagem do robô no GRACO (3).

5.3 CUSTO

Um dos principais objetivos do projeto era o de garantir que o manipulador projetado pudesse ser fabricado a um baixo custo, tendo em vista que, conforme a Tab. (1), as WMRA's são dispositivos muito caros, sendo o de mais baixo valor encontrado na faixa dos R\$ 36.000,00. Assim, a Tab. (26) reúne todos os custos envolvidos na etapa de prototipagem, ou seja, tanto os custos para realizar o *mockup* quanto o protótipo em si:

Tabela 26 - Custos mockup e protótipo.

| MOCKUP | | |
|------------------------------------|--|-------------|
| Material | Descrição | Preço |
| Papel paraná | 2 folhas de 80 x 100 cm e espessura de 416 g | R\$ 30,50 |
| Palito de churrasco | Pacote com 50 unidades | R\$ 5,10 |
| Fita Adesiva transparente | 4 unidades de 45 mm x 40 m | R\$ 12,30 |
| Total Mockup | | R\$ 47,90 |
| PROTÓTIPO | | |
| Tubo PVC | 50 mm de diâmetro externo, 3 mm de parede e 1 m de comprimento | R\$ 15,49 |
| Tarugo Technyl Ø 60 mm | 50 cm de comprimento | R\$ 50,00 |
| Tarugo Technyl Ø 35 mm | 30 cm de comprimento | R\$ 14,50 |
| Chapa de Alumínio | 30 cm x 1 m com 2 mm de espessura | R\$ 259,00 |
| Abraçadeira D 3/4" | 2 unidades | R\$ 10,17 |
| Acoplamento flexível | 5 mm para 8 mm | R\$ 15,90 |
| Eixo aço 1045 | Ø 8 mm por 1 m de comprimento | R\$ 25,00 |
| Eixo aço 1045 | Ø 10 mm por 1 m de comprimento | R\$ 30,00 |
| Eixo aço 1045 | Ø 15 mm por 1 m de comprimento | R\$ 35,00 |
| Barra de alumínio 1060 | Seção quadrada de 50 mm por 50 cm de comprimento | R\$ 14,00 |
| Engrenagens em PLA | Impressão 3D sob demanda | R\$ 60,00 |
| Motor Mabuchi | 1 unidade LC-578VA | R\$ 65,00 |
| Motor Mabuchi | 2 unidades JC-578VA | R\$ 130,00 |
| Motor NEMA23 | 1 unidade HT23-397 | R\$ 133,23 |
| Motor NEMA17 | 2 unidades 42HS48-1684 | R\$ 152,48 |
| Rolamento KFL Ø8 | 2 unidades | R\$ 35,80 |
| Rolamento KFL Ø10 | 6 unidades | R\$ 107,40 |
| Rolamento KFL Ø15 | 2 unidades | R\$ 35,80 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M3 | 16 unidades | R\$ 9,00 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M4 | 10 unidades | R\$ 9,00 |
| Parafuso allen M5 | 78 unidades | R\$ 23,92 |
| Porca allen e Arruela M5 | 30 unidades | R\$ 12,00 |
| Parafuso allen, Porca e Arruela M6 | 20 unidades | R\$ 9,00 |
| Total Protótipo | | R\$ 1251,69 |
| MOCKUP + PROTÓTIPO | | |
| Total Mockup + Protótipo | | R\$ 1299,59 |

No caso do *mockup* e do protótipo desenvolvido não se contabilizaram os custos associados à mão-de-obra e hora-máquina dos equipamentos, uma vez que não se teve gastos com isso pois se contou com o auxílio dos técnicos mecânicos do laboratório do SG09 e do GRACO e sua infraestrutura de maquinários. Outro gasto não contabilizado, mas que deverá ser acrescido em trabalhos futuros é o do controle do robô, dos drivers de acionamento dos motores e demais componentes elétricos e eletrônicos, bem como os componentes que compõem a garra.

Assim, a Tab. (26) ilustra que mesmo somados os gastos com o *mockup* e o protótipo este valor é de apenas 3,6% do valor da solução mais barata, o *Raptor Arm*, o que se constitui de um excelente resultado do ponto de vista da meta de projeto de minimizar custos.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho se concentrou em desenvolver todo o arcabouço teórico necessário relativo à análise cinemática e dinâmica de manipuladores; levantar e discutir os principais aspectos construtivos das cadeiras de rodas; seleção e dimensionamento de elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos; estudar as soluções de WMRA existentes tanto no mercado quanto nos ambientes acadêmicos, utilizar *softwares* de modelagem como a RTB, o *SOLIDWORKS* e o *MATLAB*, definir a metodologia e o projeto em si do braço manipulador montado sobre cadeira de rodas e, ainda, prototipar a solução desenvolvida de forma a permitir que trabalhos futuros possam aperfeiçoar este projeto bem como complementá-lo.

O robô projetado conta com uma massa própria de 5,29 kg, considerando já a massa dos atuadores, o que é menor do que o limite máximo estabelecido de 10 kg. Além disso, o custo do robô foi muito reduzido se comparado com as soluções já desenvolvidas, sendo apenas 3,6% do valor da solução mais barata existente. Tudo isso foi atingido sem abrir mão do *payload* estabelecido de 1,2 kg e do comprimento total do manipulador de 1,1 m.

Todo o projeto mecânico foi realizado e documentado no presente trabalho, o que garante a base necessária para que trabalhos futuros possam se aprofundar no controle do robô, no projeto eletroeletrônico deste, no projeto de otimização topológica dos componentes, no projeto da garra, no projeto de visão computacional, na análise de desempenho do robô e, ainda, no estudo aprofundado do aspecto mercadológico para fazer com que a WMRA projetada chegue aos milhões de brasileiros que necessitam desta tecnologia assistiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1992). Chavetas inclinadas, com ou sem cabeça, e os rasgos correspondentes. *ANBT NBR 6417*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT. (2015). ABNT NBR 9050. *Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2018). ABNT NBR 5648. *Tubos e conexões de PVC-U com junta soldável para sistemas prediais de água fria - Requisitos*. Brasil: ABNT.
- ABRAFIN. (2018). *Desordens da Função Neurológica e Fisioterapia*. Acesso em 30 de Outubro de 2018, disponível em Associação Brasileira de Fisioterapia Neurofuncional: <http://abrafin.org.br/desordens-da-funcao-neurologica-e-fisioterapia/>
- AGMA. (1995). *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helicoidal Gear Teeth*. Alexandria: American Gear Manufactures Association.
- ASAHI. (2019). Ball Bearing Catalog. ASAHI. Acesso em 19 de Junho de 2019, disponível em http://www.asahiseiko.co.jp/english/img/cata01_silber.pdf
- Balaguer, C., Gimenez, A., Huete, A., Sabatini, A., Topping, M., & Bolmsjo, G. (2006). The Mats Robot - Service Climbing Robot for Personal Assistance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 51-58.
- Bersch, R. (2017). *Introdução à Tecnologia Assistiva*. Acesso em 20 de Setembro de 2018, disponível em [www.assistiva.com.br](http://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf): http://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf
- Cabral, E. L. (2017). *Cinemática Direta*. Acesso em 03 de Novembro de 2018, disponível em Eduardo Lobo Lustosa Cabral: <http://sites.poli.usp.br/p/eduardo.cabral/>
- Canadian Business. (13 de Setembro de 2018). *Meet Canada's Fastest-Growing Manufacturing Companies: 2018 Growth 500*. Acesso em 26 de Setembro de 2018, disponível em Canadian Business: <https://www.canadianbusiness.com/lists-and-rankings/growth-500/2018-manufacturing-fastest-growing-companies/>
- Capille, J. W., Carey, S., M. Alqasemi, R., & Dubey, R. (2011). Kinematic Evaluation of Commercial Wheelchair-Mounted Robotic Arms. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 711-716.
- Carrara, V. (2015). *Introdução à Robótica Industrial*. Apostila. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Collins, J. A. (2006). *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas*. LTC. São Paulo.
- Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control - Fundamental Algorithms in MATLAB*. Berlin: Springer.
- Craig, J. (2012). *Robótica* (3ª ed.). São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- D. Edwards, K. (2005). Design, construction and testing of a wheelchair mounted robotic arm. *Graduate Theses and Dissertations*. Tampa, Flórida, Estados Unidos da América: University of South Florida.

- Deyle, T. (16 de Agosto de 2010). *Telescoping Robot Arm for Wheelchair-Mounted Object Retrieval*. Acesso em 6 de Outubro de 2018, disponível em Hizook - Robotics News for Academics & Professionals: <http://www.hizook.com/blog/2010/08/16/telescoping-robot-arm-wheelchair-mounted-object-retrieval>
- Endeavor Brasil. (2015). *O Guia Prático para o seu MVP – Minimum Viable Product*. Acesso em 21 de Setembro de 2018, disponível em Endeavor Brasil: <https://endeavor.org.br/estrategia-e-gestao/mvp/>
- Exact Dynamics. (2018). *iARM*. Acesso em 26 de Setembro de 2018, disponível em Exact Dynamics.
- Furtado, R. A. (2017). RETROFIT MECÂNICO DE UM ROBÔ MANIPULADOR DIDÁTICO. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasília, Distrito Federal, Brasil: UnB.
- G. Budynas, R., & Keith Nisbett, J. (2016). *Elementos de Máquinas de Shigley* (10ª ed.). Porto Alegre: McGraw Hill.
- Greenlee, R. (25 de Março de 2002). Design for Manufacturing - Guidelines. Albuquerque, Novo México, Estados Unidos: University of New Mexico.
- Henriques, A. (2017). Projeto de Eixos. *Notas de Aula*. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Projeto de Máquinas 1 (UnB).
- Henriques, A. M. (2017). Análise de Tensão e Projeto de Engrenagens. *Notas de Aula*. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Projeto de Máquinas 1 (UnB).
- Henriques, A. M. (2017). Rolamentos. *Notas de Aula*. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Projeto de Máquinas 1 (UnB).
- Henriques, A. M. (2018). Os Fundamentos do Projeto. *Notas de Aula*, 52-55. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Projeto de Sistemas Mecânicos (UNB).
- Hibbeler, R. C. (2010). *Resistência dos Materiais* (7ª ed.). São Paulo, São Paulo: Pearson.
- Hillman, M., Hagan, K., Hagan, S., Jepson, J., & Orpwood, R. (2002). The Weston Wheelchair mounted assistive robot - the design story. *Robotica, Cambridge University Press*, 125-132.
- IBGE. (2010). *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Instituto Novo Ser. (2018). *Lesão Medular*. Acesso em 30 de Outubro de 2018, disponível em Instituto Novo Ser: http://www.novoser.org.br/espacao_informacao_lm.html
- Juvinall, R. C. (2013). *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas* (4ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- KALATEC Automação. (2019). *KALATEC Automação*. Acesso em 16 de Junho de 2019, disponível em <https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-12nm/>
- KALATEC Automação. (2019). *KALATEC Automação*. Acesso em 16 de Junho de 2019, disponível em <https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-para-impressora-3d/>
- Kalil, E. (15 de Setembro de 2011). *Lesões na coluna*. Acesso em 30 de Outubro de 2018, disponível em Drauzio Varella: <https://drauziovarella.uol.com.br/entrevistas-2/lesoes-na-coluna/>
- Kinova Technology. (2018). *JACO Assistive Robotic Arm*. Acesso em 26 de Setembro de 2018, disponível em <https://www.kinovarobotics.com/en/products/assistive-robotics/jaco-assistive-robotic-arm>.

- M. Alqasemi, R., J. McCaffrey, E., D. Edwards, K., & V. Dubey, R. (2005). Analysis, Evaluation and Development of Wheelchair-Mounted Robotic Arms. *9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 469-472.
- Mabuchi Motor. (2019). *Mabuchi Motor*. Acesso em 16 de Junho de 2019, disponível em <https://www.mabuchi-motor.com/product/knowledge/>
- MATWEB. (2018). Acesso em 1 de Novembro de 2018, disponível em <http://www.matweb.com/>.
- Norton, R. (2013). *Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada*. São Paulo: Bookman.
- Organização Mundial da Saúde. (2012). *Cadeira de Rodas - Pacote de Treinamento em Serviços*. São Paulo: Secretaria de Estado dos Direitos da Pessoa com Deficiência de São Paulo.
- Ortobras. (2018). *Cadeira de Rodas ULX*. Acesso em 04 de Novembro de 2018, disponível em Ortobras: a vida não para: https://ortobras.com.br/cadeira-de-rodas/ulx/?page=home&cat=manuais_dobraveis
- Papadakis Ktistakis, I., & G. Bourbakis, N. (2015). A Survey on Robotic Wheelchairs mounted with Robotic Arms. *IEEE*, 258-262.
- PTI. (2019). KFL 000 - 2-Bolt Flanged Housing Series. PTI. Acesso em 19 de Junho de 2019, disponível em <https://www.pti.eu/pdf/stainless/kfl000.pdf>
- Rapacki, E. (2009). The Design of an Underactuated Wheelchair-Mounted Robotic Arm to unlatch door knobs and handles. Lowell, Massachusetts, Estados Unidos da América: University of Massachusetts.
- Santos, W. (2015). *Robótica Industrial: fundamentos, tecnologias, programação e simulação*. São Paulo: Érica.
- Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República - SDH/PR. (2009). *Tecnologia Assistiva*. Brasília: Comitê de Ajudas Técnicas.
- SIEMENS. (Janeiro de 2006). Motores de Corrente Contínua - Guia rápido para uma especificação precisa. SIEMENS.
- SOLIDWORKS. (2019). *Ajuda do SOLIDWORKS*. Acesso em 20 de Junho de 2019, disponível em SOLIDWORKS: http://help.solidworks.com/2016/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_SOLIDWORKS_Simulation_Fundamentals.htm?id=155f4488713b4ff69988065be1897f73#Pg0
- Song, W.-K., Lee, H.-Y., Kim, J.-S., Yoon, Y.-S., & Bien, Z. (1998). KARES - Intelligent Rehabilitation Robotic System for the Disabled and the Elderly. *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2682-2685.
- United Nations. (2016). *A ONU e as pessoas com deficiência*. Acesso em 20 de Setembro de 2018, disponível em ONU BR: <https://nacoesunidas.org/acao/pessoas-com-deficiencia/>
- United Nations. (2018). *United Nations - Disability*. Acesso em 20 de Setembro de 2018, disponível em United Nations: <https://www.un.org/development/desa/disabilities/disability-and-ageing.html>

- Vidal Filho, W., Avila, R., Quinteros, C., Queiroga, G., & Van Els, R. (2010). *Desenvolvimento de kit para automação de cadeira de rodas convencional*. Campina Grande: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Wang, W., Suga, Y., & Sugano, S. (2010). Task Execution Support of a Wheelchair Mounted Robotic Arm in Activity of Daily Livings. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 201-207.
- Zavadil, P., Scherer, F., Teixeira, F., da Silva, R., Koltermann, T., & Cattani, A. (2014). Possibilidades de uso da matriz morfológica no processo de geração de alternativas em design. *Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design*, 1-12.

APÊNDICE

| | | Pág. |
|--------------|--|------|
| Apêndice I | Programa em <i>MATLAB</i> para cálculo da matriz de transformação homogênea | 123 |
| Apêndice II | Programa em <i>MATLAB</i> para modelagem do Robô com a <i>Robotics Toolbox for MATLAB</i> | 124 |
| Apêndice III | Programa em <i>MATLAB</i> para estimativa dos torques atuantes nas juntas e cálculo da deflexão do manipulador | 125 |
| Apêndice IV | Programa em <i>MATLAB</i> para implementação da Equação de Newton-Euler | 127 |
| Apêndice V | Programa em <i>MATLAB</i> para projeto de engrenagens | 130 |
| Apêndice VI | Programa em <i>MATLAB</i> para projeto de eixos | 134 |
| Apêndice VII | Desenhos Técnicos | 139 |

APÊNDICE I: Programa em *MATLAB* para cálculo da matriz de transformação homogênea

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041

clc
clear all
close all

dh = [
    0 0.17 0 90
    0 0 0.35 0
    0 0 0.35 0
    0 0 0.15 -90
    0 0 0 -90
    0 0.2 0 0
]; % modelagem por DH

theta=sym('theta',[6 1]);
a = sym('a',[6 1]);
d = sym('d',[6,1]);
alpha(:,1)=dh(:,4);

[ldh cdh] = size(dh);
% Matrizes de Transformação
for i=1:1:ldh
    A = [
        cos(theta(i,1)) -sin(theta(i,1))*cosd(alpha(i,1))
        sin(theta(i,1))*sind(alpha(i,1)) a(i,1)*cos(theta(i,1))
        sin(theta(i,1)) cos(theta(i,1))*cosd(alpha(i,1)) -
        cos(theta(i,1))*sind(alpha(i,1)) a(i,1)*sin(theta(i,1))
        0 sind(alpha(i,1)) cosd(alpha(i,1)) d(i,1)
        0 0 0 1
    ];
    if i ==1
        A01 = A;
    elseif i==2
        A12=A;
    elseif i==3
        A23=A;
    elseif i==4
        A34=A;
    elseif i==5
        A45=A;
    elseif i==6
        A56=A;
    end
end
% Matriz de Transformação Homogênea
A06 = A01*A12*A23*A34*A45*A56;
R06 = A06(1:3, 1:3);
x06 = A06(1:3, 4);
```

APÊNDICE II: Programa em *MATLAB* para modelagem do Robô com a *Robotics Toolbox for MATLAB*

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041
clc
clear all
close all

dh = [
    0 0.17 0 pi/2
    0 0 0.35 0
    0 0 0.35 0
    0 0 0.15 -pi/2
    0 0 0 -pi/2
    0 0.2 0 0
    ];
L(1) = Link([dh(1,:)]);
L(2) = Link([dh(2,:)]);
L(3) = Link([dh(3,:)]);
L(4) = Link([dh(4,:)]);
L(5) = Link([dh(5,:)]);
L(6) = Link([dh(6,:)]);
L

%massas dos links kg
L(1).m = 1.39;
L(2).m = 1.1;
L(3).m = 1.1;
L(4).m = 0.55;
L(5).m = 0.47;
L(6).m = 0.01;

%
%      rx      ry      rz
L(1).r = [0 0 dh(1,2)/2];
L(2).r = [dh(2,3)/2 0 0];
L(3).r = [dh(3,3)/2 0 0];
L(4).r = [dh(4,3)/2 0 0];
L(5).r = [0 0 0];
L(6).r = [0 0 dh(6,2)/2];

%
%      Ixx      Iyy      Izz      Ixy      Iyz      Ixz
L(1).I = [0.0097 0.0136 0.0078 -0.0018 0.0054 -0.0022];
L(2).I = [0.0015 0.0125 0.0126 0.0001 -0.0007 -0.0002];
L(3).I = [0.0015 0.0125 0.0126 -0.0001 0.0007 -0.0002];
L(4).I = [0.0015 0.0019 0.0031 0.001 0 0];
L(5).I = [0.0002 0.0014 0.0014 0 0 0];
L(6).I = [0.0001 0.0001 0.0001 0 0 0];

pg=SerialLink(L, 'name', 'PG2 Luiz Fernando');

qz = ([0 0 0 0 0 0]);
qr = ([0 pi/2 0 0 0 0]);
qg = ([0 0 8*pi/9 -8*pi/9 -pi/2 0]);
q1 = ([0 0 0 0 -pi/2 0]);

T1 = pg.fkine(qz); %matriz homogênea para ângulos de junta qz
T2 = pg.fkine(qr);

t = [0:0.1:3]'; %vetor coluna do tempo
T = ctraj(T1,T2,length(t)); %matriz trans homog para cada time step
q = pg.ikine(T); %cinemática inversa de T

path = transl(T); %end effector path x-y

pg.plot(qz, 'jvec')
```

APÊNDICE III: Programa em *MATLAB* para estimativa dos torques atuantes nas juntas e cálculo da deflexão do manipulador

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041
clc
clear all
close all

%% Inputs
rho = 1380; % massa específica PVC em kg/m^3
E = 2.84*10^9; % módulo de Young em Pa

g = 9.81; % gravidade em m/s^2
L1 = 0.35; % comprimento do link 1 em m
L2 = 0.35; % comprimento do link 2 em m
Lg = 0.35; % comprimento da garra em m
t = 2; % tempo em s
vmax = 15*10^-2; % velocidade máxima em m/s

FS = 1; % Fator de Segurança global mínimo
P = 1.2*g; % Força do payload em N
A1 = 1*g; % Peso do Atuador 1 em N
A2 = 0.6*g; % Peso do Atuador 2 em N
A3 = 0.6*g; % Peso do Atuador 3 em N

% Tubo de PVC
do = 50*10^-3; % diâmetro externo em m
e = 3*10^-3; % espessura em m

%% Equações
R = do/2; % raio externo em m
r = do/2 - e; % raio interno em m
L = L1+L2+Lg; % comprimento total em m

% Pesos
W1 = rho*g*pi*L1*(R^2-r^2); %Peso do Link 1
W2 = rho*g*pi*L2*(R^2-r^2); %Peso do Link 2
W3 = rho*g*pi*Lg*(R^2-r^2); %Peso da garra

% Torques Estáticos
Te3 = W3*Lg/2 + P*Lg; %Torque Estático no atuador 3 em N.m
Te2 = L2*(W2/2+A3+W3+P)+Lg*(W3/2+P); %Torque Estático no atuador 2 em N.m
Te1 = L1*(W1/2+A2+W2+A3+W3+P)+L2*(W2/2+A3+W3+P)+Lg*(W3/2+P); %Torque Estático no
atuador 1 em N.m

% Deflexão
E=2.84e9;
a=0.3936;
m=0:0.1:1.2;
P=m*g;
L=1.0765;
W=51.9184;
D=50e-3;
d=44e-3;
I=pi*(D^4-d^4)/64;
sigma = (2*P*L^3+W*a^2*(3*L-a))/(6*E*I); %m
sigma=sigma*10^3;
plot(sigma,m);
grid on
xlabel('Deflexão (mm)')
ylabel('Payload (kg)')
title('Variação da Deflexão com o aumento do Payload')

% Correção Torques com FS
T1c = T1e*FS;
T2c = T2e*FS;
T3c = T3e*FS;
```

```
text = 'Torque na junta 1 = %g N.m';
str = sprintf(text,T1c);
disp(str)

text = 'Torque na junta 2 = %g N.m';
str = sprintf(text,T2c);
disp(str)

text = 'Torque na junta 3 = %g N.m';
str = sprintf(text,T3c);
disp(str)

text = 'Torque na junta 1 = %g kg.cm';
str = sprintf(text,T1c*10.1971621);
disp(str)

text = 'Torque na junta 2 = %g kg.cm';
str = sprintf(text,T2c*10.1971621);
disp(str)

text = 'Torque na junta 3 = %g kg.cm';
str = sprintf(text,T3c*10.1971621);
disp(str)
```

APÊNDICE IV: Programa em *MATLAB* para implementação da Equação de Newton-Euler

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041

clc
clear all
close all
dh = [
    0 0.17 0 pi/2
    0 0 0.35 0
    0 0 0.35 0
    0 0 0.15 -pi/2
    0 0 0 -pi/2
    0 0.2 0 0
    ];

g = 9.81; % gravidade em m/s^2
L = dh(2,3)+dh(3,3)+dh(4,3)+dh(6,2);
t = 2; % tempo em s
vmax = 15*10^-2; % velocidade máxima em m/s
v_angmax = vmax/L;
alphamax = v_angmax/t;
payload = 1.2*g; % Força do payload em N

% TUB-058
do = 50*10^-3; % diâmetro externo em m
e = 3.0*10^-3; % espessura em m

%Condições Iniciais
thetad1 = [0 0 0].';
thetadd1 = [0 0 alphamax].';
thetad2 = thetad1;
thetadd2 = thetadd1;
thetad3 = thetad1;
thetadd3 = thetadd1;
thetad4 = thetad1;
thetadd4 = thetadd1;
thetad5 = thetad1;
thetadd5 = thetadd1;
thetad6 = thetad1;
thetadd6 = thetadd1;
wd0= [0 0 0].'; %aceleração angular da base
w0= [0 0 0].'; % velocidade angular da base
vd0 = [0 0 -g].';%aceleração linear da base é igual a gravidade m/s^2
f6=[-payload 0 0].'; %força inicial = peso do carregamento em N
n6=[0 0 0].'; % momento inicial

%robô estendido:
theta_1 =0 ;
theta_2 =0 ;
theta_3=0;
theta_4=0;
theta_5=-pi/2;
theta_6=pi/2;
Ze = [0 0 1].';

%Vetores posição em metro
P1=[0 0 dh(1,2)].';
P2=[dh(2,3) 0 0].';
P3=[dh(3,3) 0 0].';
P4=[dh(4,3) 0 0].';
P5=[0 0 0].';
P6=[0 0 dh(6,2)].';

PC0 = [0.0085 -0.0175 0.1015].';
PC1 = [0.2544 0.0085 -0.0176].';
PC2 = [0.2544 -0.0085 0.0176].';
PC3 = [0.1146 0.0365 0].';
```

```

PC4 = [0.1032 0 0].';
PC5 = [0 0 0.1].';

%massa em kg
m0=1.39;
m1=1.1;
m2=1.1;
m3=0.55;
m4=0.47;
m5=0.01;

%Matriz de inercia em Kg m²
I0= [0.0097 -0.0018 0.0054;-0.0018 0.0136 -0.0022;0.0054 -0.0022 0.0078];
I1= [0.0015 0.0001 -0.0007;0.0001 0.0125 -0.0002;-0.0007 -0.0002 0.0126];
I2= [0.0015 -0.0001 0.0007;-0.0001 0.0125 -0.0002;0.0007 -0.0002 0.0126];
I3= [0.0015 0.0010 0;0.001 0.0019 0;0 0 0.0031];
I4= [0.0002 0.001 0;0.001 0.0019 0;0 0 0.0031];
I5= [0.0001 0 0;0 0.0001 0;0 0 0.0001];

%Matrizes de rotação:
R01=[cos(theta_1) 0 sin(theta_1);sin(theta_1) 0 -cos(theta_1);0 1 0];
R10 = R01.';
R12=[cos(theta_2) -sin(theta_2) 0;sin(theta_2) cos(theta_2) 0;0 0 1];
R21 = R12.';
R23=[cos(theta_3) -sin(theta_3) 0;sin(theta_3) cos(theta_3) 0;0 0 1];
R32 = R23.';
R34=[cos(theta_4) 0 -sin(theta_4);sin(theta_4) 0 cos(theta_4);0 -1 0];%theta_4mais
pi/2
R43 = R34.';
R45=[cos(theta_5) 0 -sin(theta_5);sin(theta_5) 0 cos(theta_5);0 -1 0];
R54 = R45.';
R56=[cos(theta_6) -sin(theta_6) 0;sin(theta_6) cos(theta_6) 0;0 0 1];
R65 = R56.';

%Iterações para fora
%Elo0
vd0c = cross(wd0,PC0)+cross(w0,cross(w0,PC0))+vd0;
F0=m0*vd0c; % calculo da força no centro de massa
N0= I0*wd0+cross(w0,I0*w0);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo1
w1 = R01*w0 +thetad1; % Velocidade angular
wd1 = R01*wd0 + cross(R01*w0,thetad1)+ thetadd1; %aceleração angular
vd1 = R01*(cross(wd0,P1) + cross(w0,cross(w0,P1)) + vd0);%aceleração linear
referente ao sistema de coordenadas,
vd1c = cross(wd1,PC1) + cross(w1,cross(w1,PC1)) + vd1; %aceleração linear referente
ao centro de massa
F1=m1*vd1c; % calculo da força no centro de massa
N1= I1*wd1+cross(w1,I1*w1);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo2
w2 = R12*w1 +thetad2; % Velocidade angular
wd2 = R12*wd1 + cross(R12*w1,thetad2)+ thetadd2; %aceleração angular
vd2 = R12*(cross(wd1,P1) + cross(w1,cross(w1,P1)) + vd1);%aceleração linear
referente ao sistema de coordenadas
vd2c = cross(wd2,PC2) + cross(w2,cross(w2,PC2)) + vd2; %aceleração linear referente
ao centro de massa
F2=m2*vd2c; % calculo da força no centro de massa
N2= I2*wd2+cross(w2,I2*w2);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo3
w3 = R23*w2 +thetad3 ;% Velocidade angular
wd3 = R23*wd2 + cross(R23*w2,thetad3)+ thetadd3 ;%aceleração angular
vd3 = R23*(cross(wd2,P2) + cross(w2,cross(w2,P2)) + vd2);%aceleração linear
referente ao sistema de coordenadas
vd3c = cross(wd3,PC3) + cross(w3,cross(w3,PC3)) + vd3 ;%aceleração linear referente
ao centro de massa
F3=m3*vd3c ;% calculo da força no centro de massa
N3= I3*wd3+cross(w3,I3*w3);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo4
w4 = R34*w3 +thetad4 ;% Velocidade angular
wd4 = R34*wd3 + cross(R34*w3,thetad4)+ thetadd4 ;%aceleração angular

```

```

vd4 = R34*(cross(wd3,P3) + cross(w3,cross(w3,P3)) + vd3);%aceleração linear
referente ao sistema de coordenadas
vd4c = cross(wd4,PC4) + cross(w4,cross(w4,PC4)) + vd4 ;%aceleração linear referente
ao centro de massa
F4=m4*vd4c ;% calculo da força no centro de massa
N4= I4*wd4+cross(w4,I4*w4);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo5
w5 = R45*w4 +thetad5 ;% Velocidade angular
wd5 = R45*wd4 + cross(R45*w4,thetad5)+ thetadd5; %aceleração angular
vd5 = R45*(cross(wd4,P4) + cross(w4,cross(w4,P4)) + vd4);%aceleração linear
referente ao sistema de coordenadas
vd5c = cross(wd5,PC5) + cross(w5,cross(w5,PC5)) + vd5; %aceleração linear referente
ao centro de massa
F5=m5*vd5c ;% calculo da força no centro de massa
N5= I5*wd5+cross(w5,I5*w5);%calculo do momento em relação ao centro de massa
%Elo5
f5= F5 + R65*f6;
n5= N5+R65*n6 + cross(PC5, F5)+cross(P6,R65*f6);
torque5= dot(n5,Ze);
%Elo4
f4= F4 + R54*f5;
n4= N4+R54*n5 + cross(PC4, F4)+cross(P5,R54*f5);
torque4= dot(n4,Ze);
%Elo3
f3= F3 + R43*f4;
n3= N3+R43*n4 + cross(PC3, F3)+cross(P4,R43*f4);
torque3= dot(n3,Ze);
%Elo2
f2= F2 + R32*f3;
n2= N2+R32*n3 + cross(PC2, F2)+cross(P3,R32*f3);
torque2= dot(n2,Ze);
%Elo1
f1= F1 + R21*f2;
n1= N1+R21*n2 + cross(PC1, F1)+cross(P2,R21*f2);
torque1= dot(n1,Ze);

f0= F0+R10*f1;
n0= N0+R10*n1 + cross(PC0,F0) +cross(P1,R10*f1);
torque0= dot(n0,Ze);
torque = [torque0;torque1;torque2;torque3;torque4;torque5]

```

APÊNDICE V: Programa em *MATLAB* para projeto de engrenagens

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041

clc
clear all
close all

%% Condições de Contorno do Projeto

% perfil envolvental
% unidade fechada, comercial
C = 0.95; % confiabilidade desejada
phi_n = 20; % ângulo de pressão normal em [°]
vida = 10^7; % vida especificada em [ciclos]
% Plástico PLA
HB = 469; % Dureza Brinell em [HB]
Sy = 37.5; % Limite de Escoamento em [MPa]
Sut = 46.8; % Resistência à Tração em [MPa]
n = 1.36; % Fator de Segurança mínimo
% par 3
H_entrada = 7e-3; % Potência de entrada (do motor, catálogo para 9N.m) em [kW]
n_motor = 35; % rotação nominal dada pelo fabricante do motor selecionado em [rpm]

%% A razão de redução nas engrenagens de dentes retos é de 3 para 1.
red = 3;
n_2 = n_motor; % rotação da engrenagem 2 em [rpm]
n_3 = n_2/red; % rotação da engrenagem 3 em [rpm]

k = 1; % dentes de profundidade completa
% N_2 = 4*k/(2*sind(phi_n)^2); % número mínimo de dentes no pinhão 2
% N_2 = ceil(N_2);
N_2 = 8;
N_3 = N_2*n_2/n_3; % número de dentes na coroa 3

%% CHUTE INICIAL PARA O MÓDULO!
m = input ('Coloque o valor de módulo desejado: '); % em [mm], alterar toda vez que
receber a mensagem de ERRO.
% substituir valor de m dentro do seguinte intervalo [1 1.25 1.5 2 2.5 3 4 5
6 8 10]

d_2 = m*N_2; % diâmetro da engrenagem 2 em [mm]
d_3 = m*N_3; % diâmetro da engrenagem 3 em [mm]

%% Projeto para Flexão - AGMA

% Força Tangencial
Wt = 60000*H_entrada/(pi*d_2*n_2); % Carga Transmitida em [kN] de 2 em 3

% Fator de Sobrecarga Ko
Ko = 1; % uniforme (motor elétrico) e uniforme
% Fator Dinâmico Kv
Qv = 7; % Padrão de Qualidade n°7
B = 0.25*((12-Qv)^sqrt(2/3));
A = 50+56*(1-B);
V = pi*d_2*n_2/(60*10^3); % velocidade da linha primitiva de n_2 em [m/s]
Kv = ((A+sqrt(200*V))/A)^(B); % com V em [m/s]

% Fator de Tamanho Ks
Fi = 5; % chute inicial para largura de face em [mm]
Y_2 = 0.163;
Y_3 = 0.296;
% Y_2 = 0.309; % Fator de forma para N_2 = 18 e phi_n = 20°
% Y_3 = 0.4142; % Fator de forma para N_3 = 54 e phi_n = 20°
Ks_2 = 0.8433*(m*Fi*sqrt(Y_2))^(0.0535);
if Ks_2 < 1
    Ks_2 = 1;
end
```

```

end
Ks_3 = 0.8433*(m*Fi*sqrt(Y_3))^(0.0535);
if Ks_3<1
    Ks_3 = 1;
end

% Fator de Distribuição de Carga Km(Kh)
Cmc = 1; % para dentes sem coroamento
% obs Fi = b na Eq 14-32
if Fi < 25 % [mm]
    Cpf = (Fi/(10*d_2))-0.025;
elseif 25<Fi<425 % [mm]
    Cpf = (Fi/(10*d_2))-0.0375+4.92*(10^(-4))*Fi;
elseif 425<Fi<1000 % [mm]
    Cpf = (Fi/(10*d_2))-0.1109+8.15*(10^(-4))*Fi - 3.53*(10^(-7))*(Fi^2);
end
Cpm = 1.1; % para pinhão montado no intervalo entre mancais com Sl/S < 0.175
Cma = 0.127 + 0.0158*Fi - 0.93*(10^(-4))*(Fi^2); % considerando unidades fechadas,
comerciais - tab 14-9
Ce = 0.8; % para todas as condições no qual não engrenamento ajustado na montagem
ou não há compatibilidade melhorada por labidação ou não há ambos
Km = 1 + Cmc*(Cpf*Cpm+Cma*Ce);

% Fator de espessura de borda Kb
Kb = 1; % considerando mb>=1.2

% Fator geométrico para a resistência à flexão J
J_2 = 0.2;
J_3=0.2;
% J_2 = 0.31; % figura 14-6 para phi_n = 20° e dentes de altura completa no pinhão
% J_3 = 0.41; % figura 14-6 para phi_n = 20° e dentes de altura completa na coroa

% Resistência à flexão sigmafp
sigmafp = HB/2; % em [MPa]

% Fator de vida para ciclagem de tensão para resistência de flexão Yn sob
% carregamento repetido
Yn_2 = 1;
Yn_3 = 1;
% Fator de Temperatura Kt
Kt = 1; % considerando temperaturas do corpo da engrenagem de até 120°

% Fator de Confiabilidade Kr
C = 0.95;
if (C>0.5 && C <0.99)
    Kr = 0.658 - 0.0759*(log(1-C));
elseif (C > 0.99 && C <0.9999)
    Kr = 0.5 - 0.109*log(1-C);
end

%% Cálculo da Largura de Face

sigma2_all = (sigmafp*Yn_2)/(Kt*Kr);
sigma3_all = (sigmafp*Yn_3)/(Kt*Kr);
F_2 = n*Wt*10^3*Ko*Kv*Ks_2*Km*Kb*Kt*Kv/(J_2*m*sigmafp*Yn_2); % Largura de Face
contra flexão do pinhão [mm]
F_3 = n*Wt*10^3*Ko*Kv*Ks_3*Km*Kb*Kt*Kv/(J_3*m*sigmafp*Yn_3); % Largura de Face
contra flexão do pinhão [mm]

%% Projeto para Tensões de Contato - AGMA
% Os fatores Wt, Ko, Kv, Ks, Km(Kh), Kt, Kr já foram determinados.

% Coeficiente elástico Cp
Cp = 1/(3.14*((1-0.35^2)/2.79)+((1-0.33^2)/200)); % tabela 14-8 para aço na coroa
e pinhão em [MPa]
% Cp = 1/(3.14*((1-0.33^2)/200)+((1-0.33^2)/200)); % tabela 14-8 para aço na
coroa e pinhão em [MPa]

```

```

% Fator de distribuição de carga Cf(Zr)
Cf = 1; % condições diversas de superfície

% Fator Razão de Dureza Ch
Ch = 1; % pois A' = 0

% Fator geométrico I
mn = 1; % para engrenagens cilíndricas de dentes retos
mg = N_3/N_2;
I = (cosd(phi_n)*sind(phi_n)/2*mn)*(mg/(mg+1)); % para engrenagens externas

% Fator de Ciclagem Zn
Zn_2 = 1;
Zn_3 = 1;

% Resistência ao Contato Sc
Sc = HB/2; % Figura 14-5 em MPa

%% Cálculo da Largura de Face

sigmac2_all = Sc*Zn_2*Ch/(Kt*Kr);
sigmac3_all = Sc*Zn_3*Ch/(Kt*Kr);

Fc_2 = ((Cp*Kt*Kr/(Sc*Zn_2*Ch))^2)*(Wt*n*10^3*Ko*Kv*Ks_2*Km*Cf/(d_2*I)); % Largura
de Face contra tensão de contato do pinhão [mm]
Fc_3 = ((Cp*Kt*Kr/(Sc*Zn_3*Ch))^2)*(Wt*n*10^3*Ko*Kv*Ks_3*Km*Cf/(d_3*I)); % Largura
de Face contra tensão de contato da coroa [mm]

%% Larguras de Face contra flexão e tensão de contato
text = 'A largura de face do pinhão contra flexão é = %g mm';
str = sprintf(text,F_2);
disp(str)

text = 'A largura de face do pinhão contra tensão de contato é = %g mm';
str = sprintf(text,Fc_2);
disp(str)

%% LARGURA DE FACE DO PINHÃO
if Fc_2>F_2 % largura de face para tensão de contato é mais crítica
    F = ceil (Fc_2); % Número inteiro maior e mais próximo da largura de face
    escolhida[mm]
elseif F_2>Fc_2 % largura de face para flexão é mais crítica
    F = ceil (F_2); % Número inteiro maior e mais próximo da largura de face
    escolhida[mm]
end
text = 'A largura de face do pinhão a ser utilizado é = %g mm';
str = sprintf(text,F);
disp(str)

%% Recalculando parâmetros dependentes da largura de face
% Fator de tamanho Ks
Ks_2_f= 0.8433*(m*F*sqrt(Y_2))^0.0535;
if Ks_2_f<1
    Ks_2_f = 1;
end

% Fator de Distribuição de Carga Km(Kh)
Cmc_f = 1; % para dentes sem coroamento
% obs F = b na Eq 14-32
if F < 25 % [mm]
    Cpf_f = (F/(10*d_2))-0.025;
elseif 25<F<425 % [mm]
    Cpf_f = (F/(10*d_2))-0.0375+4.92*(10^(-4))*F;
elseif 425<F<1000 % [mm]
    Cpf_f = (F/(10*d_2))-0.1109+8.15*(10^(-4))*F - 3.53*(10^(-7))*(F^2);
end
Cpm_f = 1; % para pinhão montado no intervalo entre mancais com S1/S < 0.175
Cma_f = 0.127 + 0.0158*F - 0.93*(10^(-4))*(F^2); % considerando unidades fechadas,
comerciais - tab 14-9

```

```

Ce_f = 1; % para todas as condições no qual não engrenamento ajustado na montagem
ou não há compatibilidade melhorada por labidação ou não há ambos
Km_f = 1 + Cmc_f*(Cpf_f*Cpm_f+Cma_f*Ce_f);

% Cálculo do sigma2_f
sigma2_f = Wt*10^3*Ko*Kv*Ks_2_f*Km_f*Kb/(F*m*J_2);

% Cálculo do sigmac2_f
sigmac2_f = Cp*sqrt(Wt*10^3*Ko*Kv*Ks_2*Km*Cf/(d_2*F*I));

% FATOR DE SEGURANÇA A FLEXÃO
FSflexao_2 = sigma2_all/sigma2_f;

text = 'O fator de segurança do pinhão contra FLEXÃO é de %g';
str = sprintf(text,FSflexao_2);
disp(str)

% FATOR DE SEGURANÇA A TENSÃO DE CONTATO
FScontato_2 = (sigmac2_all/sigmac2_f)^2;

text = 'O fator de segurança do pinhão contra TENSÃO DE CONTATO é de %g';
str = sprintf(text,FScontato_2);
disp(str)

if FScontato_2 < FSflexao_2
    text = 'O desgaste é o fator de risco para funcionamento, para engrenagens não-
coroadas';
    disp (text)
elseif FSflexao_2 < FScontato_2
    text = 'A flexão é o fator de risco para funcionamento, para engrenagens não-
coroadas';
    disp (text)
end

```

APÊNDICE VI: Programa em *MATLAB* para projeto de eixos

```
% Aluno: Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto
% Matrícula: 140152041
clc
clear all
close all

%% EIXO%%
%% Condições de Contorno do Projeto

% perfil envolvental
% unidade fechada, comercial
C = 0.95; % confiabilidade desejada
phi_n = 20; % ângulo de pressão normal em [°]
vida = 10^7; % vida especificada em [ciclos]

n = 1.36; % Fator de Segurança mínimo
H_entrada = 7e-3; % em [kW]
n_motor = 35; % em [rpm]

%%
%eixo a,c;
% red = 2;

%eixo b
red=3;

%eixo e
% red=1;
%%
n_2 = n_motor; % rotação da engrenagem 2 em [rpm]
n_3 = n_2/red; % rotação da engrenagem 3 em [rpm]

k = 1; % dentes de profundidade completa
%%
%eixo a
% N_2 = 4*k/(2*sind(phi_n)^2); % número mínimo de dentes no pinhão 2
% N_2 = ceil(N_2);

%eixo b, c, e
N_2=8;

N_3 = N_2*n_2/n_3; % número de dentes na coroa 3
%% Análise Cinética
m = 2; % módulo de 2 e 3 em [mm]
d_2 = m*N_2; % diâmetro da engrenagem 2 em [mm]
d_3 = m*N_3; % diâmetro da engrenagem 3 em [mm]

%% Comprimento do Eixo, arbitrado pelo CAD
%eixo a
% La = 95; % em [mm]
%eixo b
La = 120;
%eixo c
% La = 104.5;
%eixo e
% La = 92;
%%
% Material do Eixo - Aço AISI 1045 CD - Norton 992
HB = 179; %Dureza Brinell
Sy = 530; % Resistência ao Escoamento em MPa
Sut = 630; % Resistência à tração em MPa
E = 205000; % módulo de elasticidade em MPa
%%
%eixo a
% a = 45;
% b = 15;
% c = 35;
```

```

%eixo b
a = 33;
b = 43.5;
c = 43.5;

%eixo c
% a = 47.5;
% b = 30;
% c = 25;

%eixo e
% a = 15;
% b = 52;
% c = 15;

%eixo a
% F = 57.27e-3; % [kN]
%eixo b
% F = 43.63e-3;
%eixo c
% F = 32.82e-3;
%eixo e
F = 16.55e-3;

%eixo a
% My = 28.4; % [N.m]
%eixo b, c
My=0;
%eixo e
% My=0.48;
%%
% Forças engrenagem 2
% Força Tangencial
Wt = 60000*H_entrada/(pi*d_2*n_2); % Carga Transmitida em [kN] de 3 em 2
% Força Radial
Wr = Wt*tand(phi_n); % Carga radial de 3 em 2 em [kN]

% Força Resultante
W = sqrt(Wt^2+Wr^2); % em [kN]

% Torque aplicado
T2a = Wt*(d_2/2); % Torque aplicado de 2 no eixo a em [N.m]

%% Eixo a
% Rbr = Wr*c/(b+c); % Reação radial no acoplamento [kN]
% Rbt = (Wt*c-My)/(b+c); % Reação tangencial no acoplamento [kN]
% Rar = Wr-Rbr; % Reação radial no mancal A [kN]
% Rat = Wt-Rbt; % Reação tangencial no mancal A [kN]
% Rba = F/2; % Reação Axial [kN]
% Raa=F/2;
% Fr_A = sqrt(Rar^2 + Rat^2+Raa^2); % Força resultante no mancal A [kN]
% Fr_B = sqrt(Rbr^2 + Rbt^2 + Rba^2); % Força resultante no acoplamento [kN]
% Myx_2 = Rbt*b;
% Mzx_2 = My;
% Ma_2 = sqrt(Myx_2^2 + Mzx_2^2); % Momento alternado no eixo a máximo [N.m]

% %eixo b
Rbr = -11.1621;
Rbt = 90.5414;
Rar = 141.6621;
Rat = -329.2414;
Rba = 0;
Raa=0;
Fr_A = sqrt(Rar^2 + Rat^2+Raa^2); % Força resultante no mancal A [kN]
Fr_B = sqrt(Rbr^2 + Rbt^2 + Rba^2); % Força resultante no acoplamento [kN]
Myx_2 = -2.8677;
Mzx_2 = 7.8771;
Ma_2 = sqrt(Myx_2^2 + Mzx_2^2); % Momento alternado no eixo a máximo [N.m]

```

```

%eixo c
% Rbr = -106.2577 ;
% Rbt = -437.6167;
% Rar = -13.4623;
% Rat =198.9167;
% Rba =0;
% Raa=0;
% Fr_A = sqrt(Rar^2 + Rat^2+Raa^2); % Força resultante no mancal A [kN]
% Fr_B = sqrt(Rbr^2 + Rbt^2 + Rba^2); % Força resultante no acoplamento [kN]
% Myx_2 = 2.1725;
% Mzx_2 = 5.9675;
% Ma_2 = sqrt(Myx_2^2 + Mzx_2^2); % Momento alternado no eixo a máximo [N.m]

%eixo e
% Myx_2 = 0;
% Mzx_2 = 0.48;
% Ma_2 = sqrt(Myx_2^2 + Mzx_2^2); % Momento alternado no eixo a máximo [N.m]
% Wt=0;
% Wr=0;
% T2a=0.5;
%% Projeto contra Deflexão
theta_all = 0.0087; % em [rad] juvenall
%Eixo a
% d_flechaA = (32 * n/(3 * pi * E* (c+b) * theta_all)) * (((-Wt * b-My) * (c+b)^2
+ Wt*b^3)^2 + (-Wr * b * (c+b)^2+Wr*b^3)^2)^(1/2))^1/4; % em [mm]
%eixo b
d_flechaA = (32 * n/(3 * pi * E* (c+b) * theta_all)) * (((F * b * ((c+b)^2-b^2) -
Wr*a*(b+c)^2)^2 + (Wt * a * (c+b)^2)^2)^(1/2))^1/4; % em [mm]
%eixo c
% d_flechaA = (32 * 10^3*n/(3 * pi * E * theta_all)) * ((Wt * c * b)^2 +(- Wr*c*b-
F*a*b)^2)^(1/2))^1/4; % em [mm]
%eixo e
% d_flechaA = ((32 *n/(3 * pi * E * theta_all) *2*a*10^-3))^1/4; % em [mm]
%% Projeto Contra Deflexão Angular
G_1045 = 80*10^3; % Módulo de Rigidez em [MPa]
thetad = 3*La/1000;
d_ang = (583.6*T2a*10^3*La/(G_1045*thetad))^1/4; % em [mm]

%% Projeto Estático - Pela teoria de Von Mises
d_est = ((16*n/(pi*Sy*10^6))*(4*(Ma_2)^2 + 3*(T2a)^2)^(0.5))^1/3; % em [m]
d_est = d_est*10^3; % em [mm]

D = [d_est d_ang,d_flechaA];
da = max(D); % valor preliminar para diâmetro do eixo

%% Projeto contra Fadiga
% Fatores modificadores do limite de resistência à fadiga
% Carregamento simples completamente reverso
if Sut > 1400 % em [MPa]
    Sel = 700; % em [MPa]
else
    Sel = 0.5*Sut;
end

%Sabemos que Se pode ser determinado por -> Se = ka*kb*kc*kd*ke*kf*Se'

% Fator de superfície ka
ka = 4.51*Sut^(-0.265); % Usinado ou laminado a frio - Tab 6-2 em [MPa]
% Fator de tamanho kb
if 2.79 <= da && da <= 51 % em [mm]
    kb = 1.24*da^(-0.107);
elseif 51 < da && da <= 254 % em [mm]
    kb = 1.51*da^(-0.157);
end
% Fator de carregamento kc
kc = 1; % flexão predomina
% Fator de temperatura kd
kd = 1; % à temperatura de 20°C

```

```

% Fator de confiabilidade ke
ke = 0.868; % condição de projeto C = 0.95
% Fator de efeitos diversos
kf = 1;

% Cálculo de Se
Se = ka*kb*kc*kd*ke*kf*Sel; % limite de endurance no local crítico de uma peça de
máquina na geometria e condição de uso em [MPa]

% Concentração de tensão e sensibilidade a entalhe
% Considerando inicialmente o eixo livre de concentradores de tensão
Kt = 1; % fator de concentração de tensão
Kts = 1; % fator de concentração de tensão - cisalhamento
q = 1; % sensibilidade ao entalhe
qs = 1; % sensibilidade ao entalhe - cisalhamento
Kf = 1 + q*(Kt - 1);
Kfs = 1 + qs*(Kts - 1);

% Dimensionando por GOODMAN
d_good = ((16*n/pi)*((2*Kf*Ma_2*10^3)/Se)+((sqrt(3)*Kfs*T2a*10^3)/Sut))^(1/3); % em
[mm]

% ASME-Elíptico - EXTRA
A = 2*Kf*Ma_2*10^3;
B = sqrt(3)*Kfs*T2a*10^3;
d_asme = (16*n*sqrt((A/Se)^2 + (B/Sy)^2)/pi)^(1/3); % em [mm]

D = [d_est d_ang d_flechaA d_good d_asme];
da = max(D); % valor preliminar para diâmetro do eixo

% Recalculando fadiga considerando um concentrador de tensão no sulco do
% anel retentor
% Correção no Fator de Tamanho kb
if 2.79 <= da && da <= 51
    kb = 1.24*da^(-0.107);
elseif 51 < da && da <= 254
    kb = 1.51*da^(-0.157);
end

% Cálculo de Se
Se = ka*kb*kc*kd*ke*kf*Sel; % limite de endurance no local crítico de uma peça de
máquina na geometria e condição de uso em [MPa]

% Concentração de tensão e sensibilidade a entalhe entre engrenagem e mancal
% Olhar Figura A-15-8
Kt = 1.38; % fator de concentração de tensão
Kts = 1.7; % fator de concentração de tensão - cisalhamento
q = 0.8; % sensibilidade ao entalhe
qs = 0.95; % sensibilidade ao entalhe - cisalhamento
Kf = 1 + q*(Kt - 1);
Kfs = 1 + qs*(Kts - 1);

% Dimensionando por GOODMAN - usando valor do momento combinado no ponto
d_good1 = ((16*n/pi)*((2*Kf*Ma_2*10^3)/Se)+((sqrt(3)*Kfs*T2a*10^3)/Sut))^(1/3); %
em [mm]

% Recalculando fadiga considerando um concentrador de tensão no sulco do
% anel retentor
% Correção no Fator de Tamanho kb
if 2.79 <= da && da <= 51
    kb = 1.24*da^(-0.107);
elseif 51 < da && da <= 254
    kb = 1.51*da^(-0.157);
end

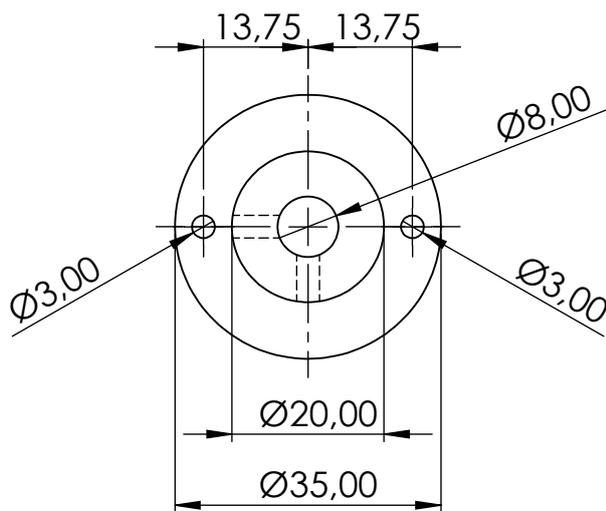
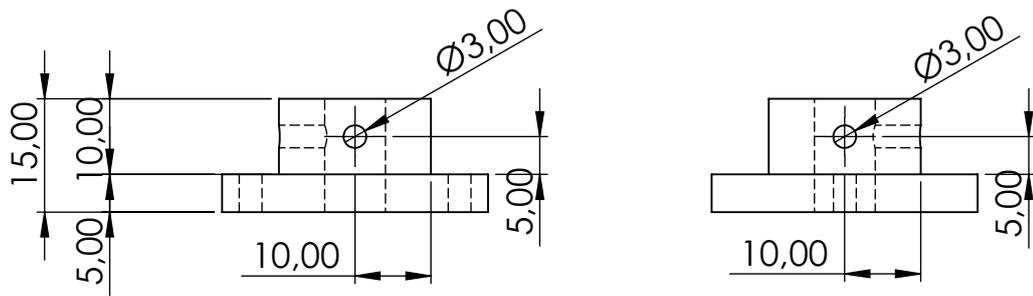
% Cálculo de Se
Se = ka*kb*kc*kd*ke*kf*Sel; % limite de endurance no local crítico de uma peça de
máquina na geometria e condição de uso em [MPa]

```

```
D = [d_est d_ang d_flechaA d_good d_asme d_good1];
da = max(D);

texto = 'O valor crítico do diâmetro do eixo a é = %g mm';
str = sprintf(texto,da);
disp(str)

%%Chavetas
b = 5;
h=5;
t=2.5;
lchaveta_c = (2*T2a*10^3*n)/(0.577*da*Sy*t);
lchaveta_e = (4*T2a*10^3*n)/(da*Sy*h);
```

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

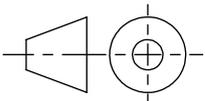
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

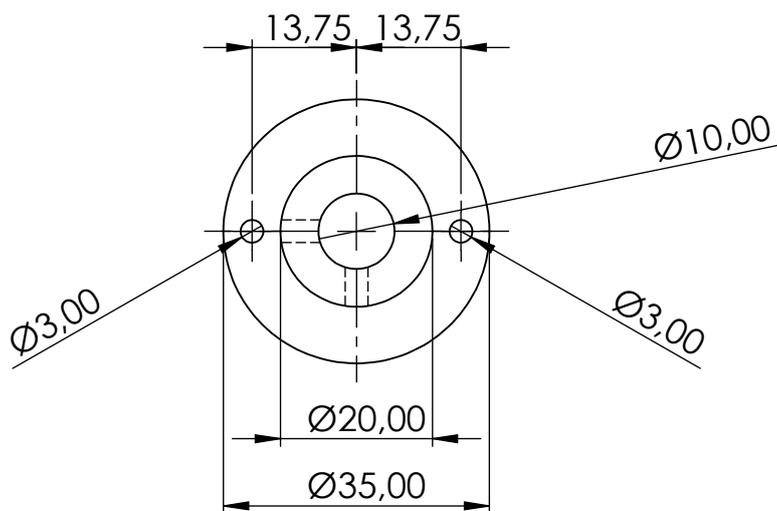
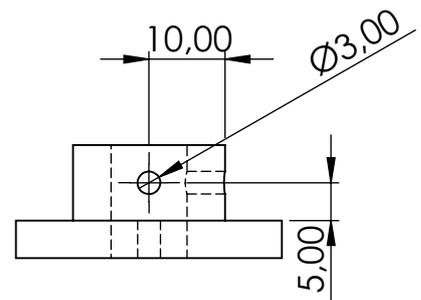
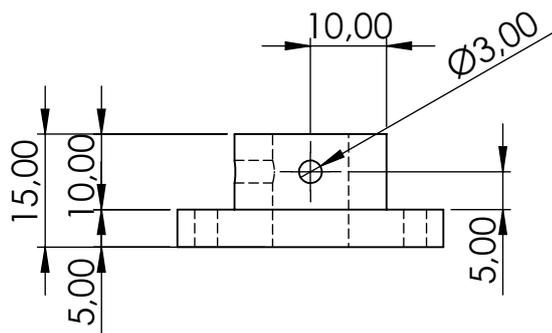
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 1

Unidade:
mm



Bucha 8 mm



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

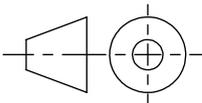
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

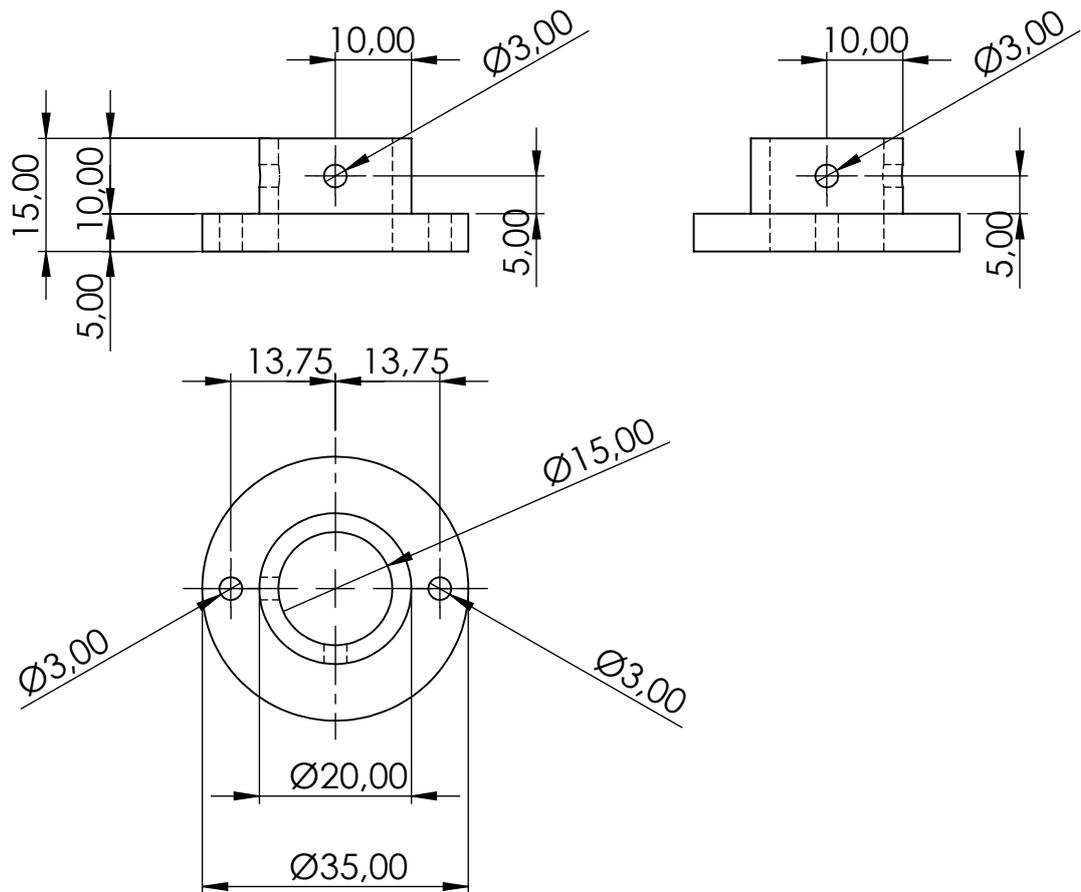
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 2

Unidade:
mm



Bucha 10 mm



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

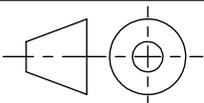
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

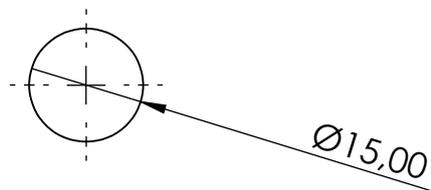
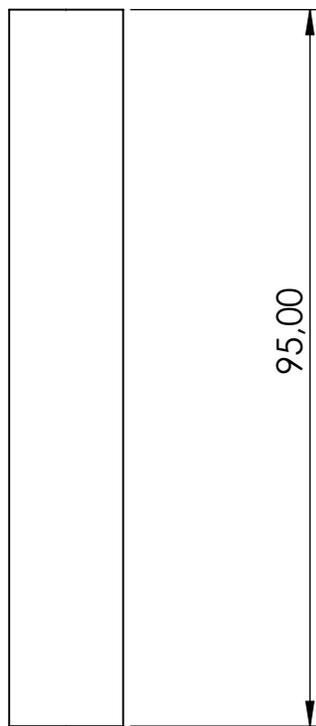
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 3

Unidade:
mm



Bucha 15 mm



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

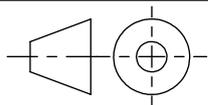
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

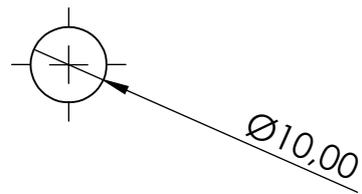
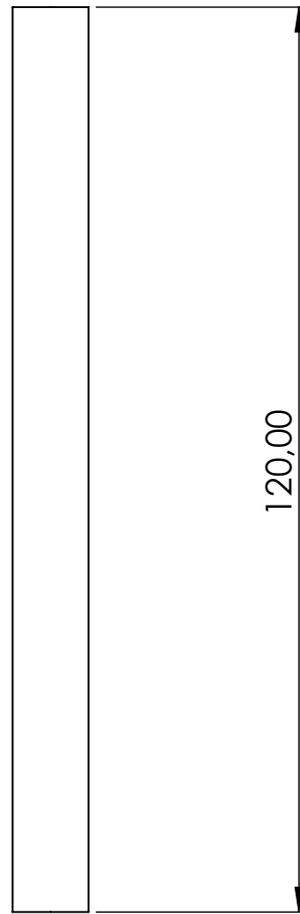
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 4

Unidade:
mm



Eixo a



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

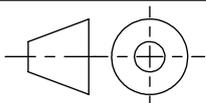
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

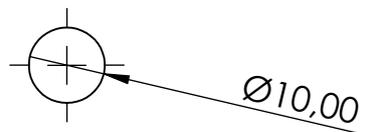
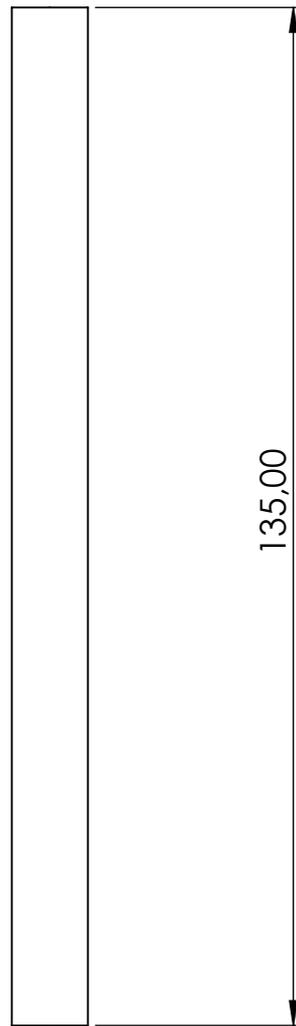
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 5

Unidade:
mm



Eixo b



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

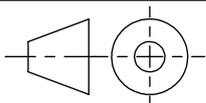
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

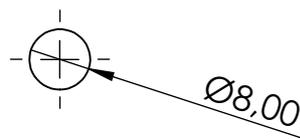
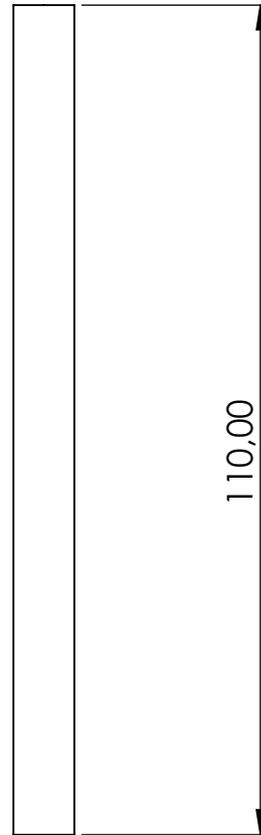
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 6

Unidade:
mm



Eixos c e d



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

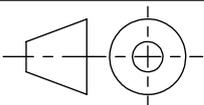
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

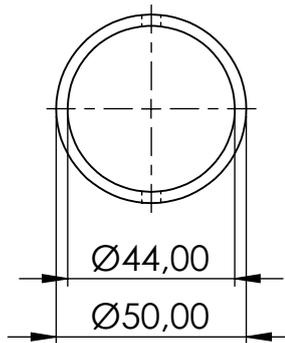
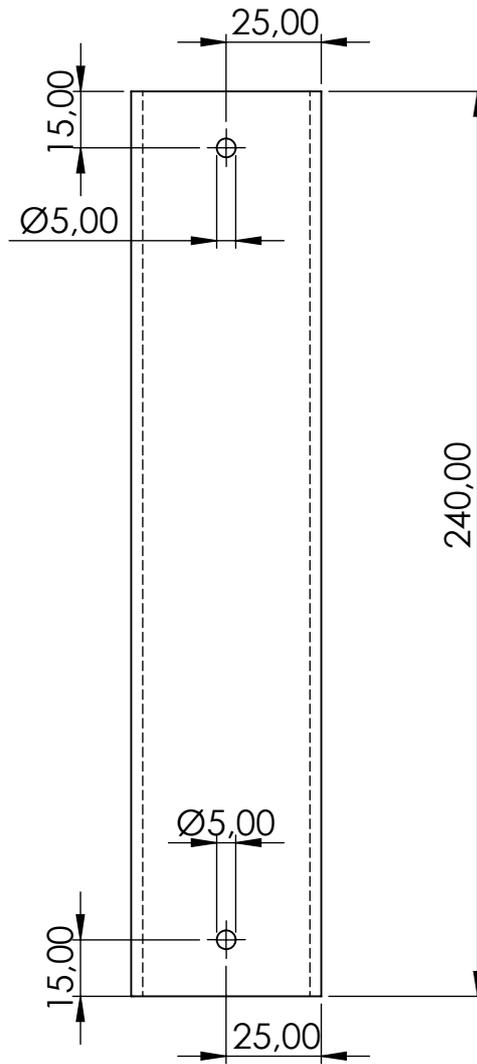
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 7

Unidade:
mm



Eixo e



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

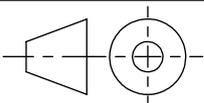
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

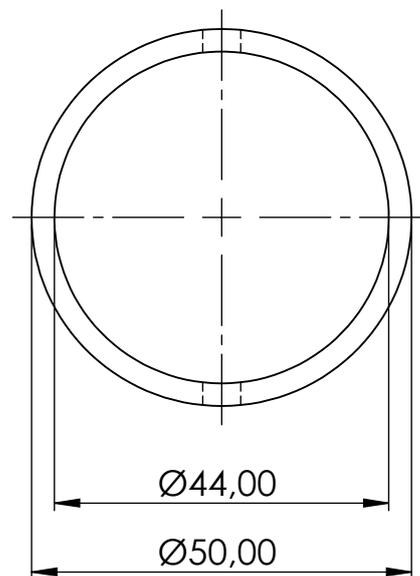
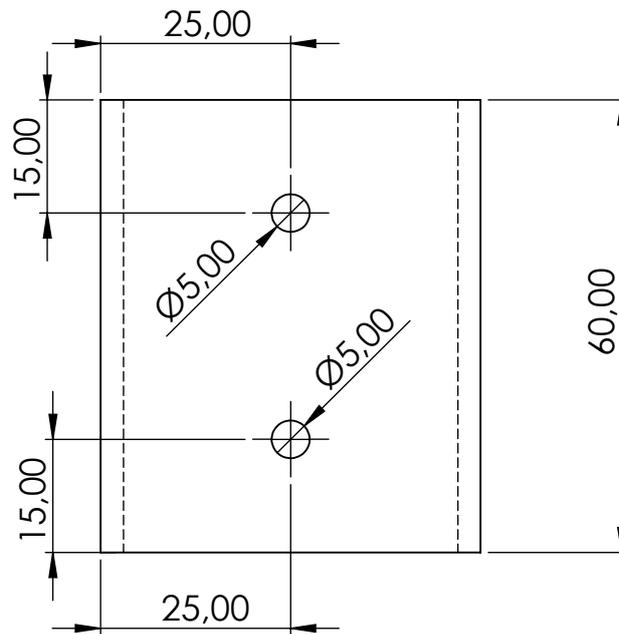
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 8

Unidade:
mm



Elos 1 e 2



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

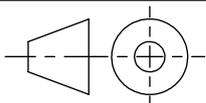
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

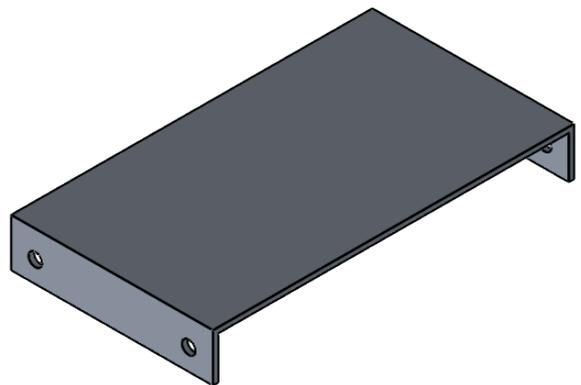
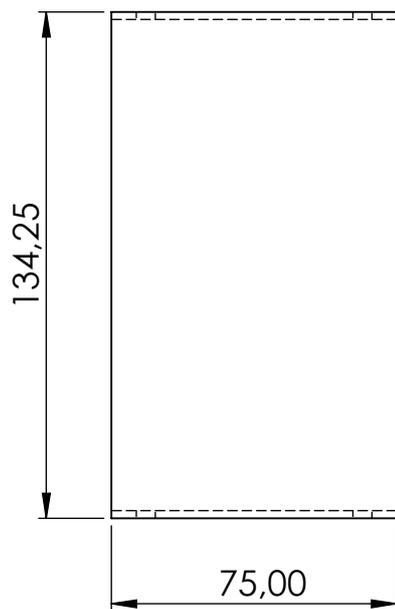
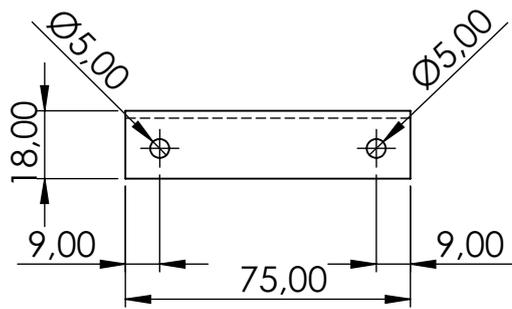
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 9

Unidade:
mm



Elos 3 e 4



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

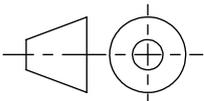
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

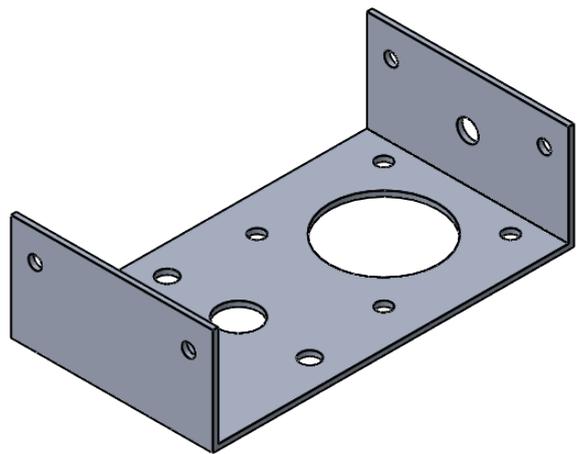
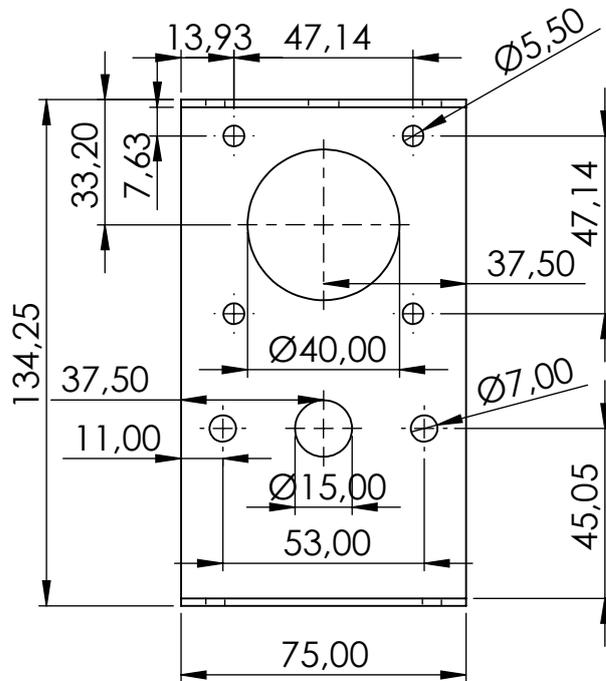
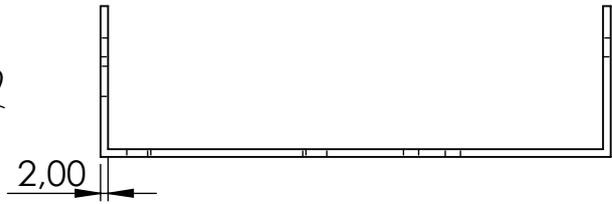
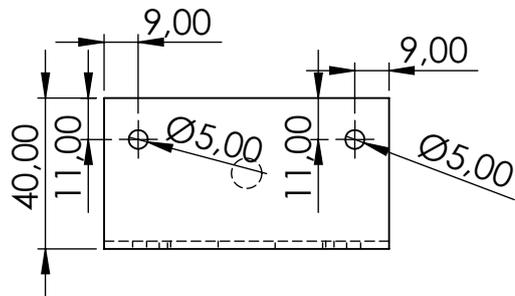
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 10

Unidade:
mm



Base parte 1



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

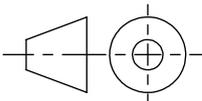
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

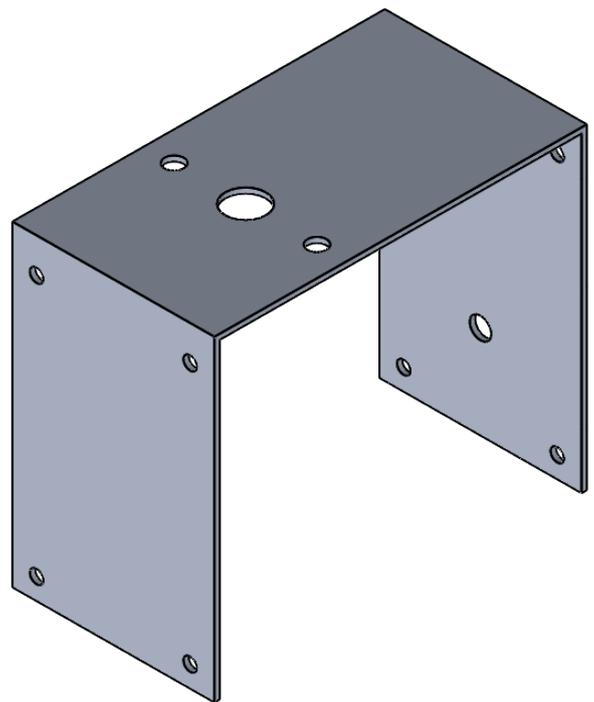
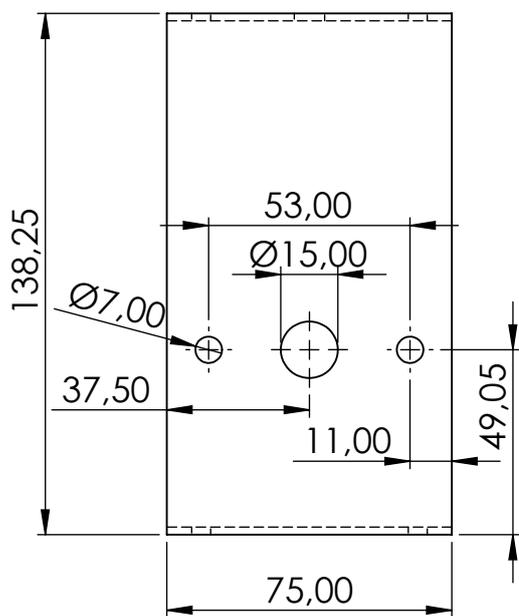
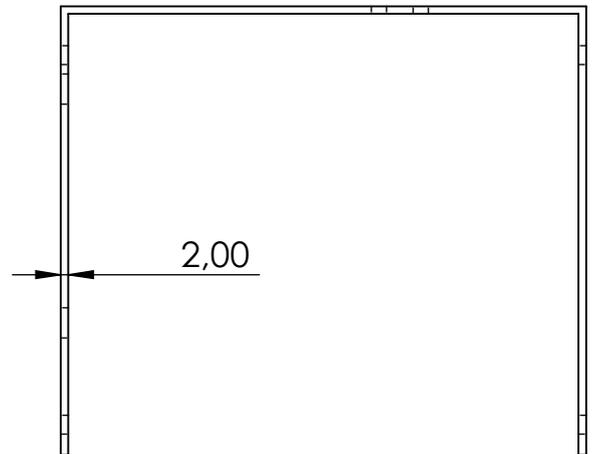
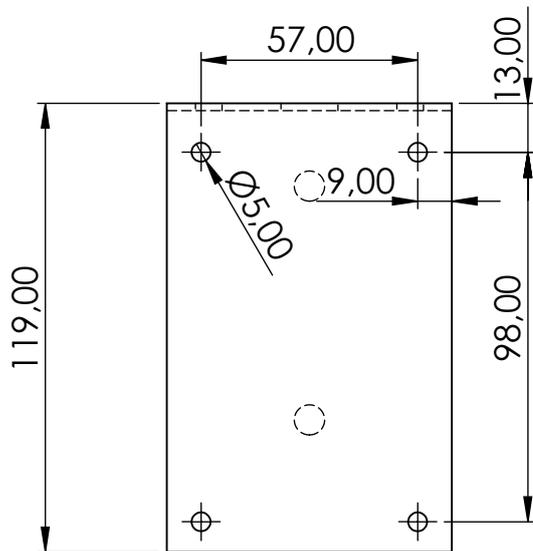
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 11

Unidade:
mm



Base parte 2



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

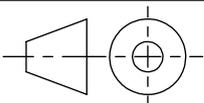
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

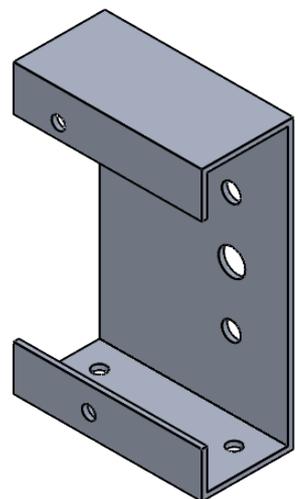
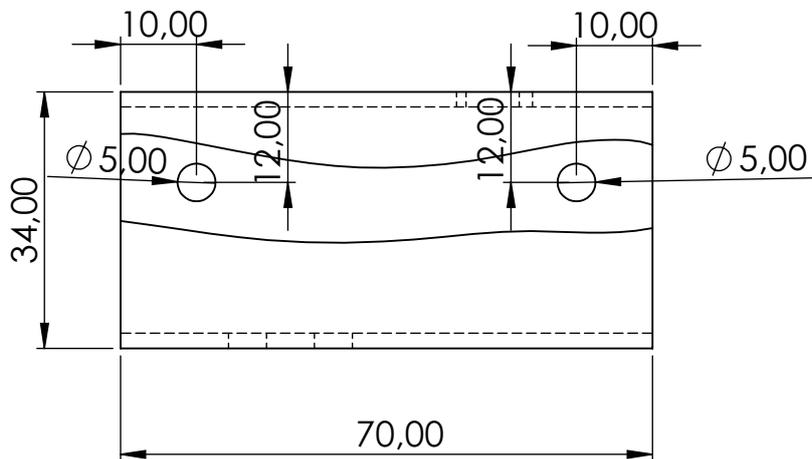
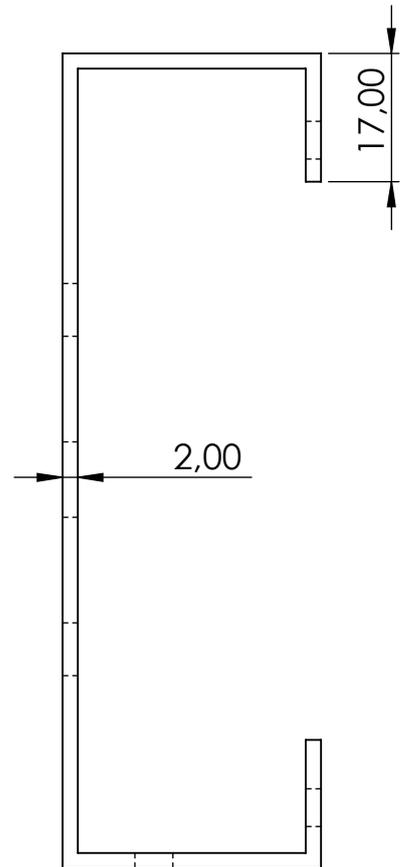
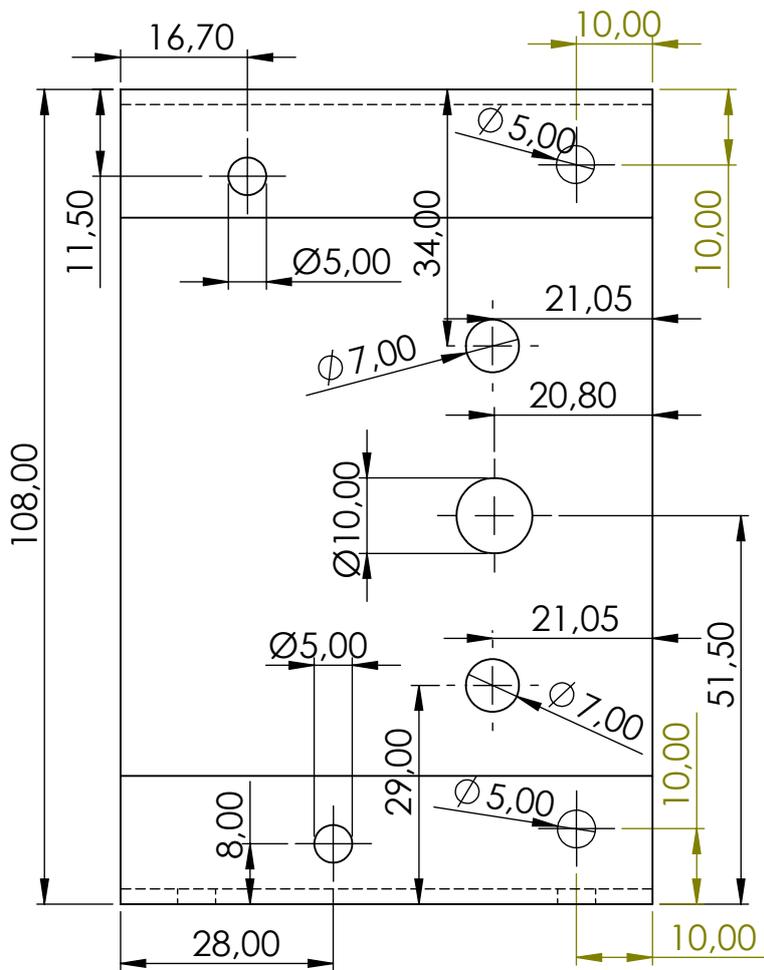
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 12

Unidade:
mm



Base parte 3



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

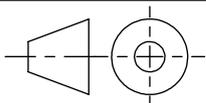
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Escala:
1:1

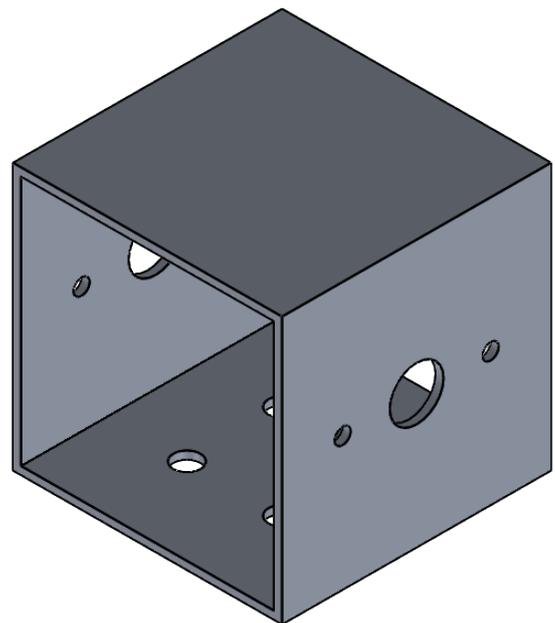
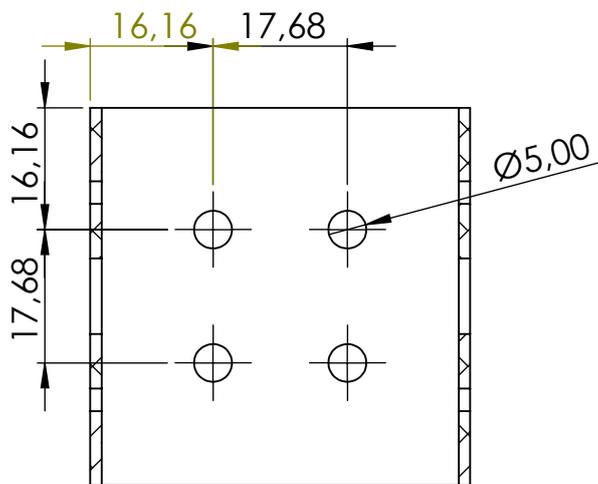
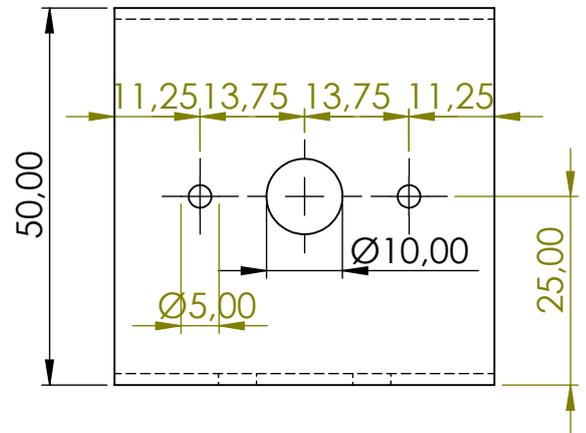
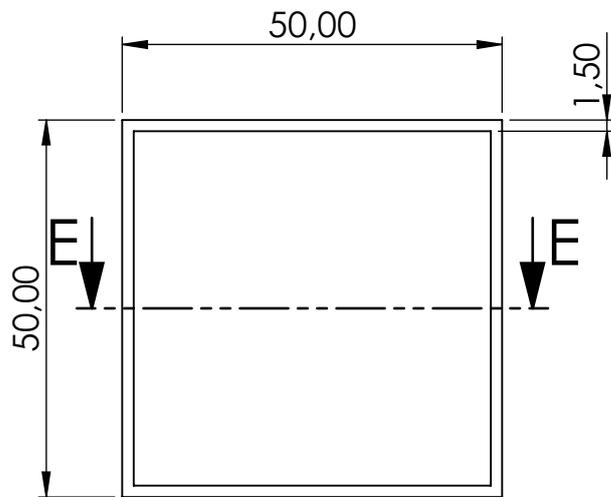
Data
09/06/2019

Folha 14

Unidade:
mm



Base parte 5



SEÇÃO E-E



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

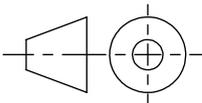
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

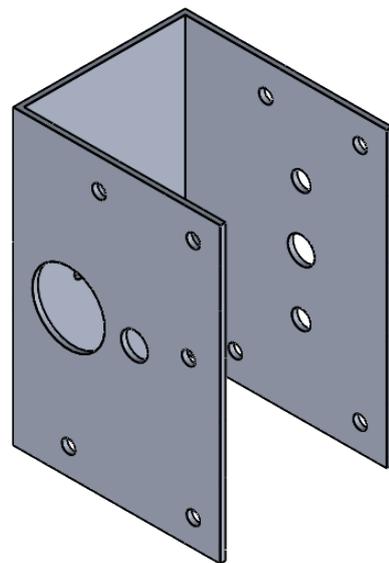
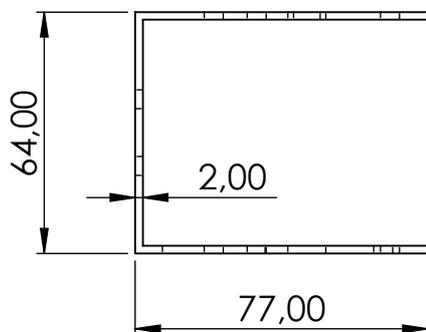
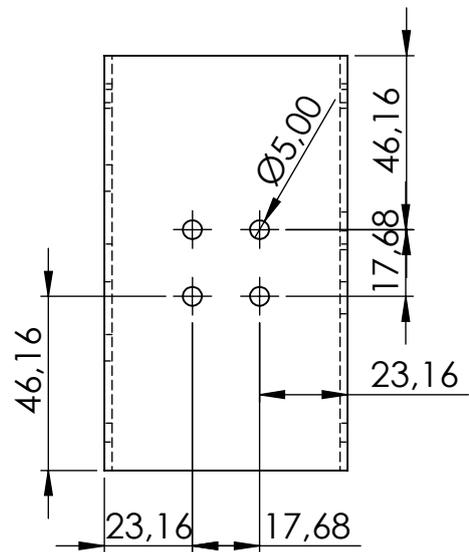
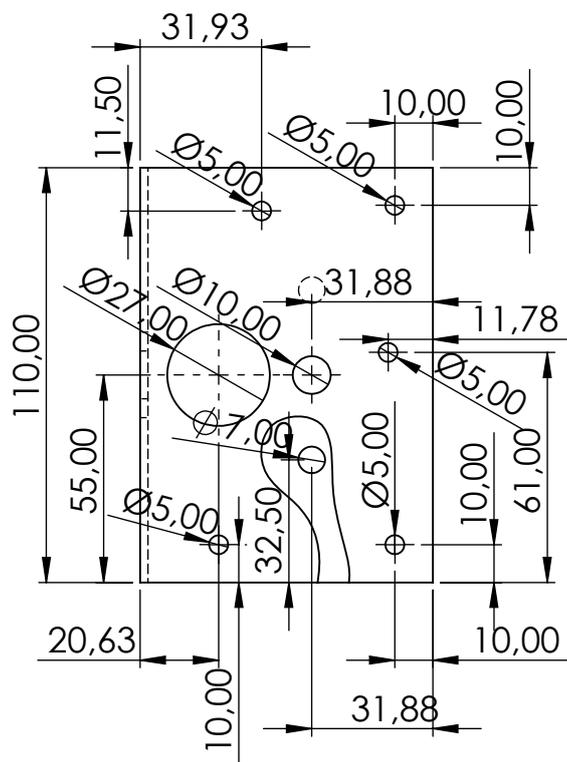
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 15

Unidade:
mm



Junta quadrada



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

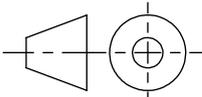
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

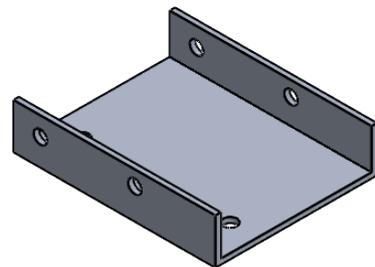
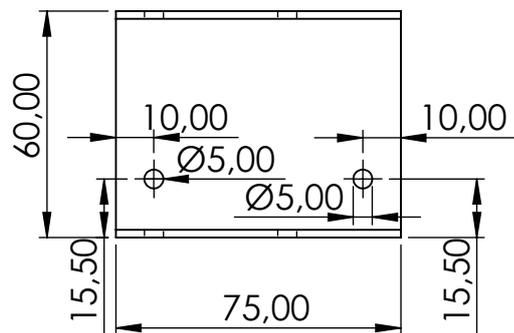
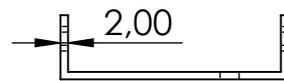
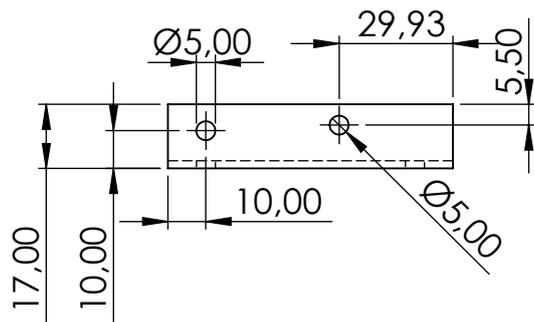
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 16

Unidade:
mm



Junta 3 parte 1



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

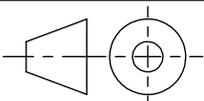
Escala:
1:2

Data
09/06/2019

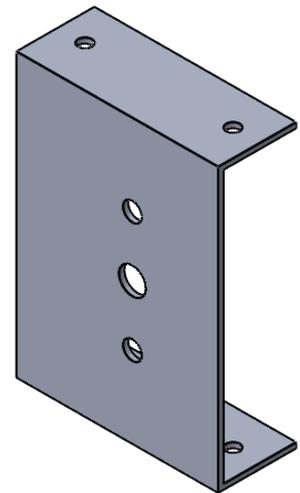
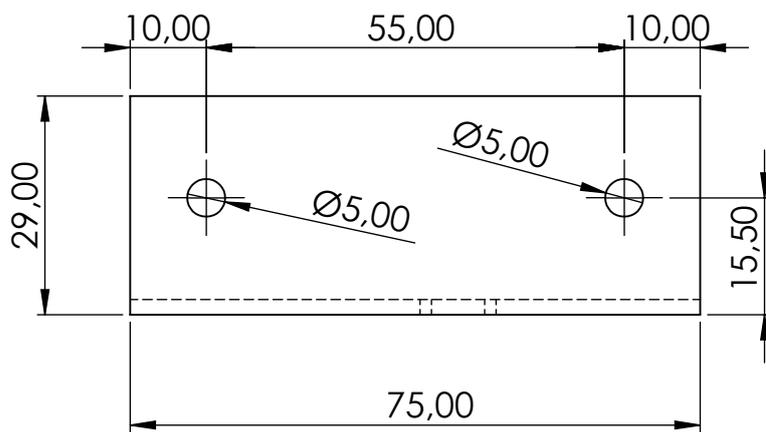
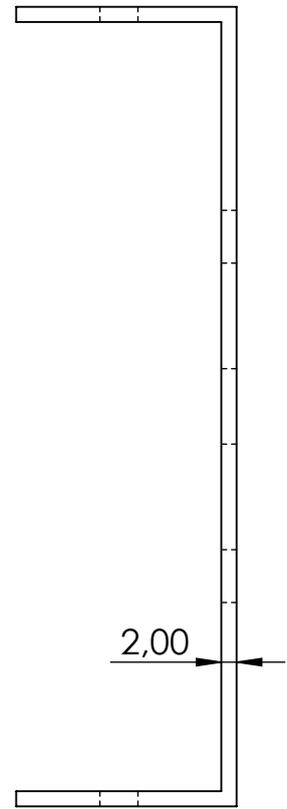
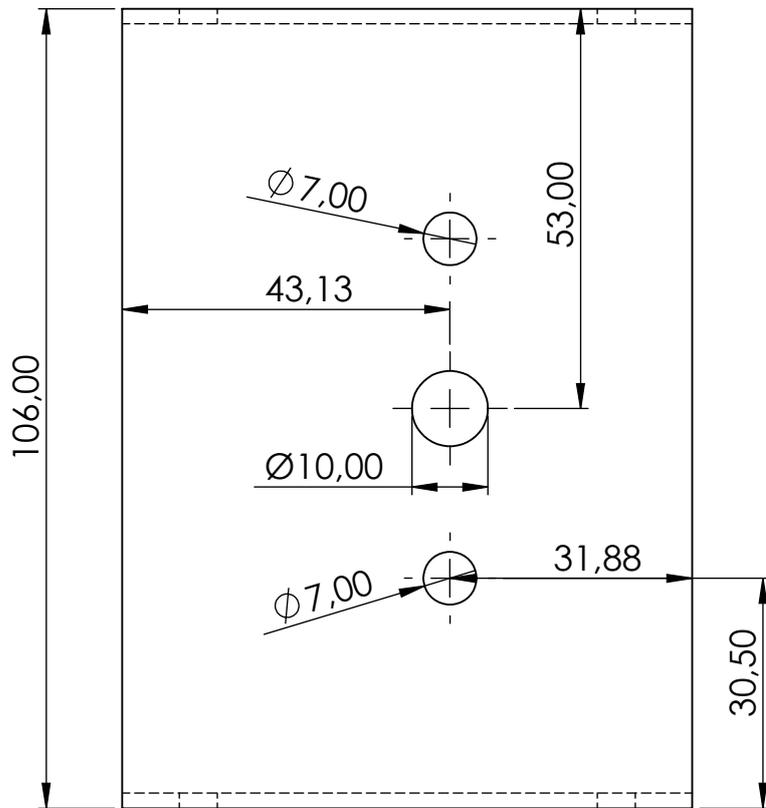
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 17

Unidade:
mm



Juntas 3 parte 2



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

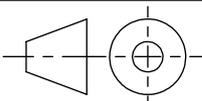
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

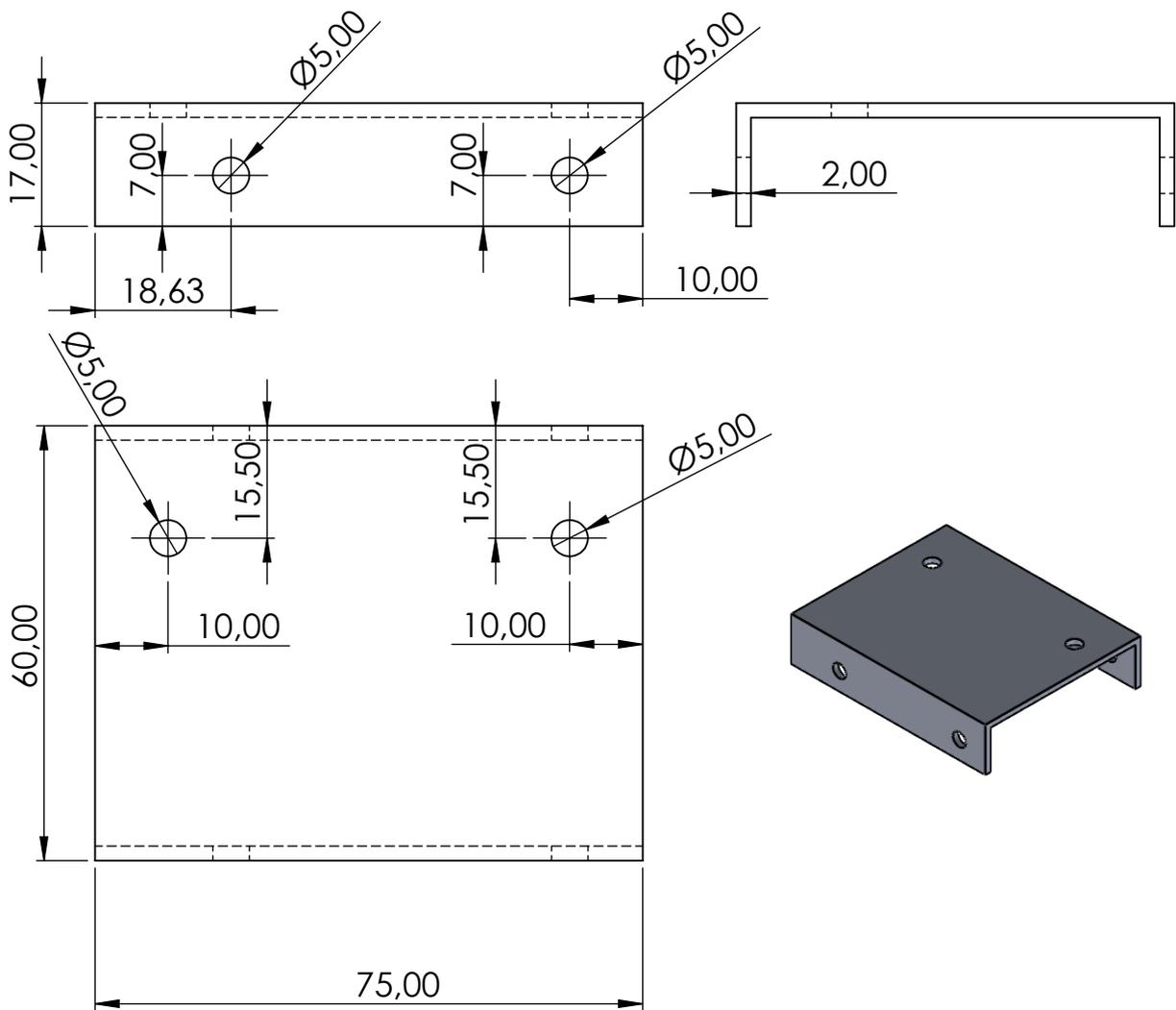
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 18

Unidade:
mm



Juntas 3 parte 3



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

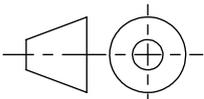
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

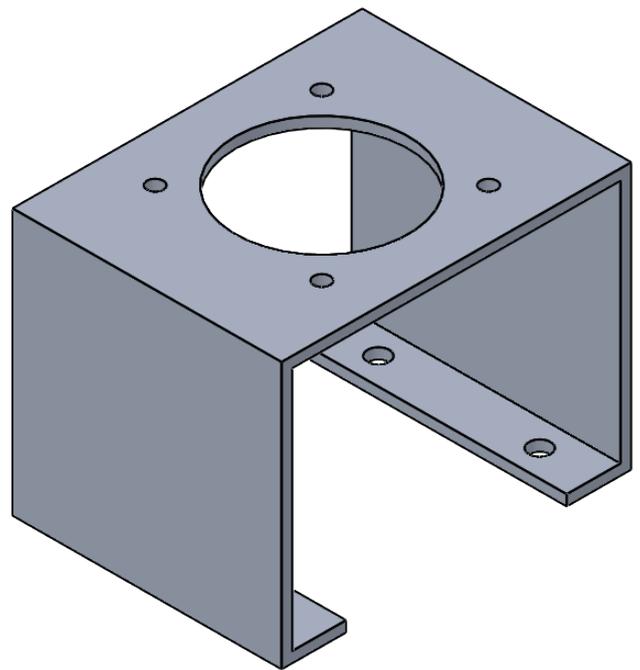
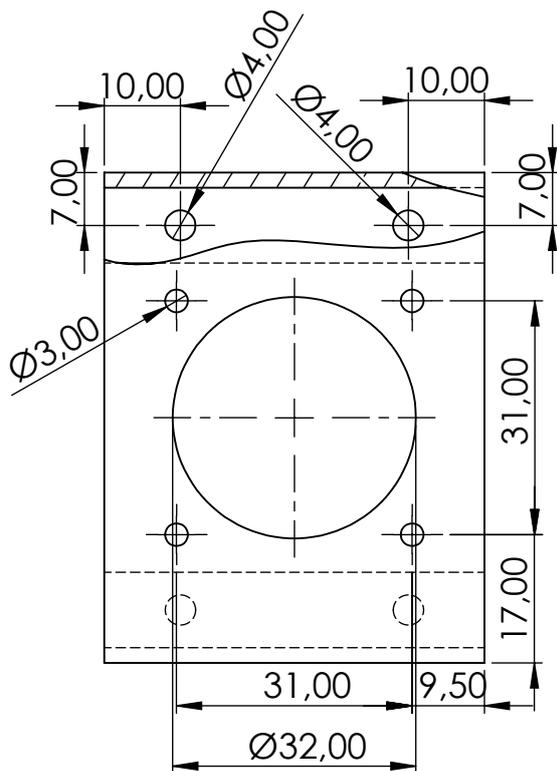
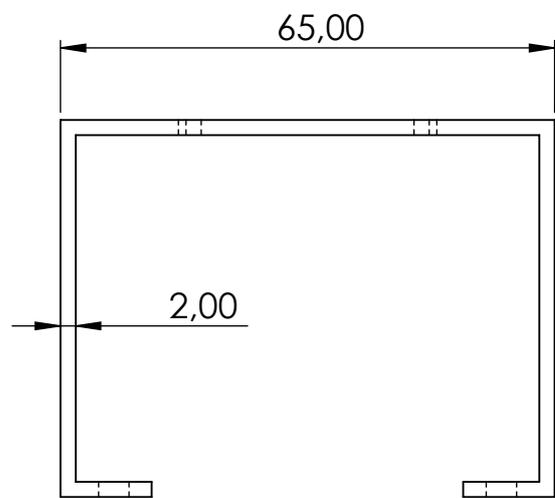
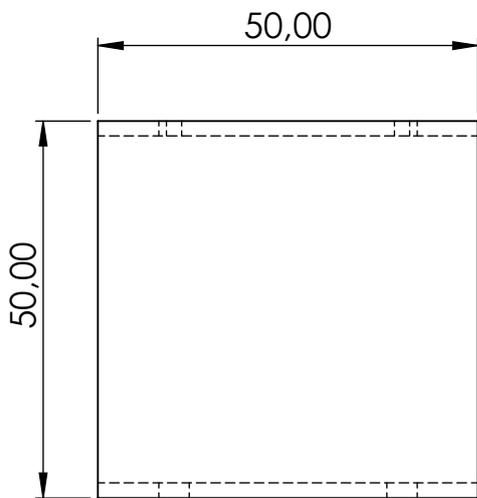
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 19

Unidade:
mm



Junta 3 parte 4



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

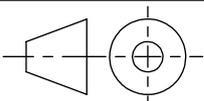
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

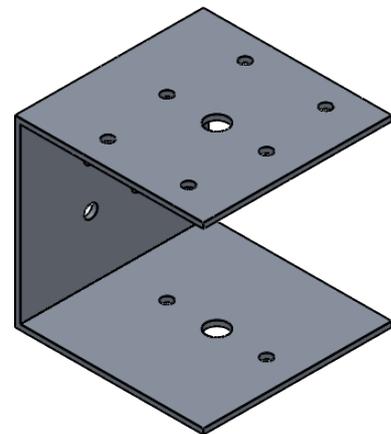
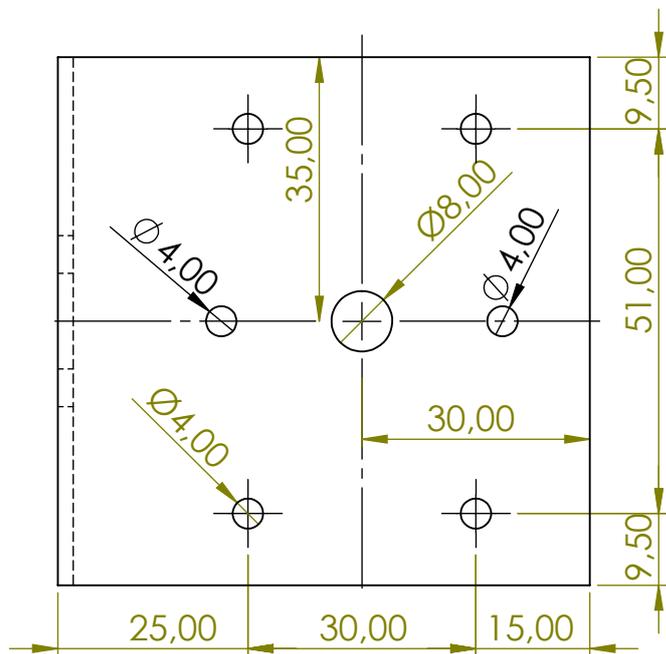
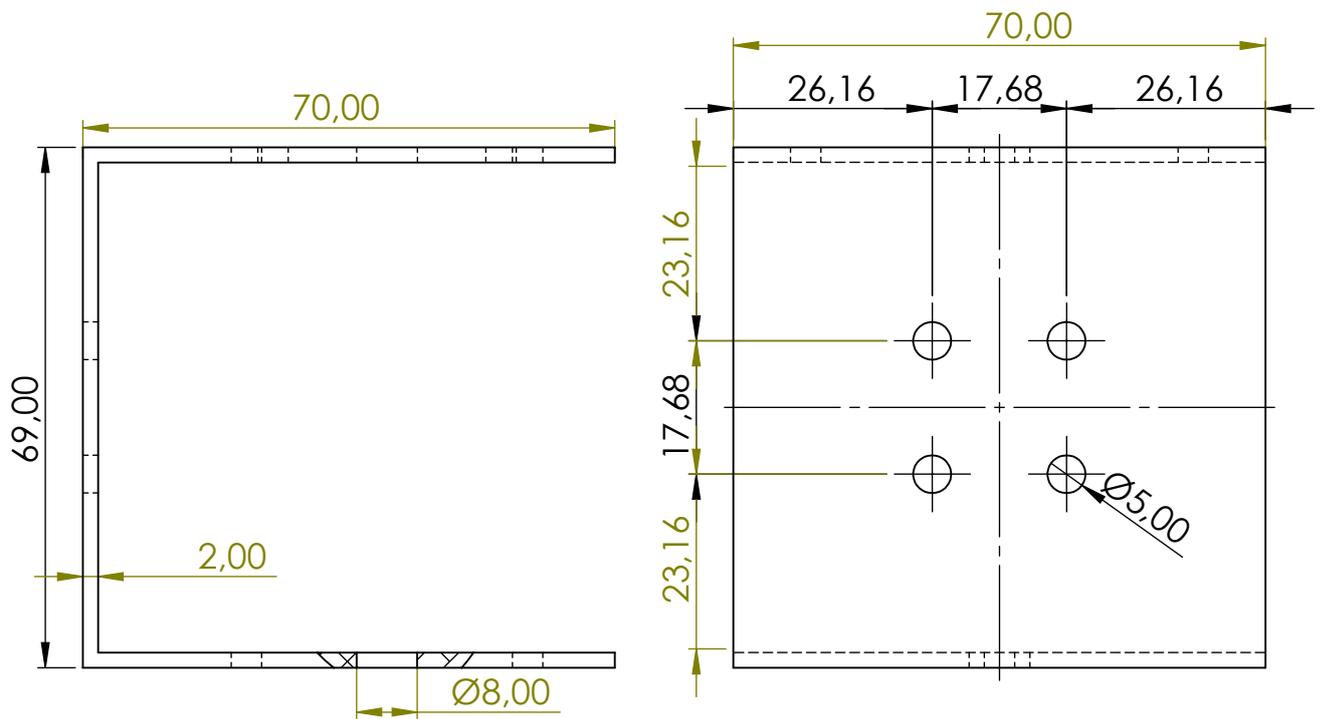
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 20

Unidade:
mm



Junta 5 parte 1



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

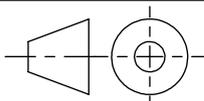
Folha 21

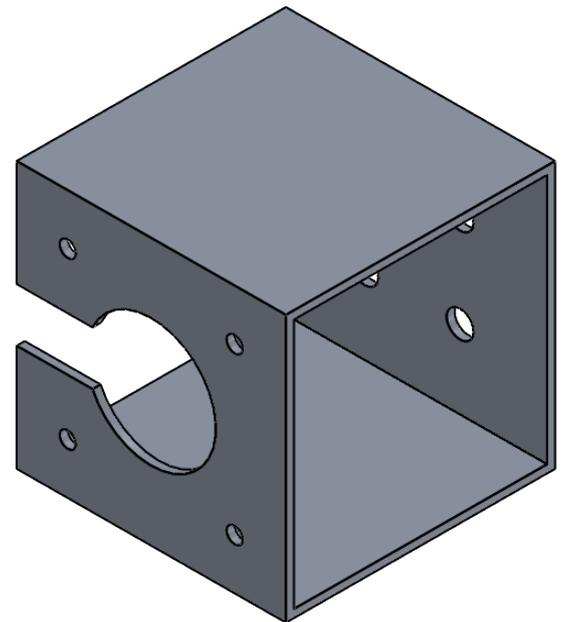
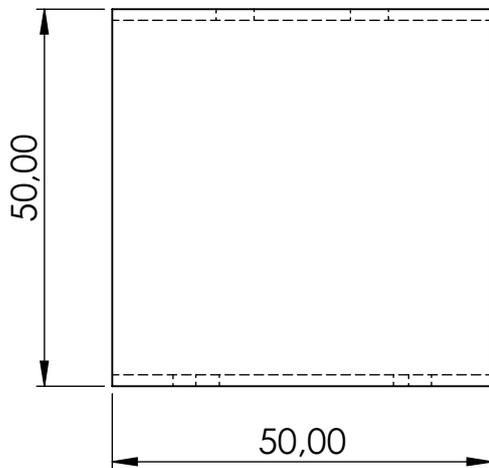
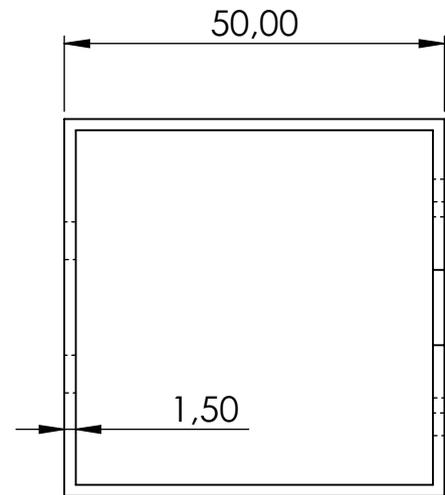
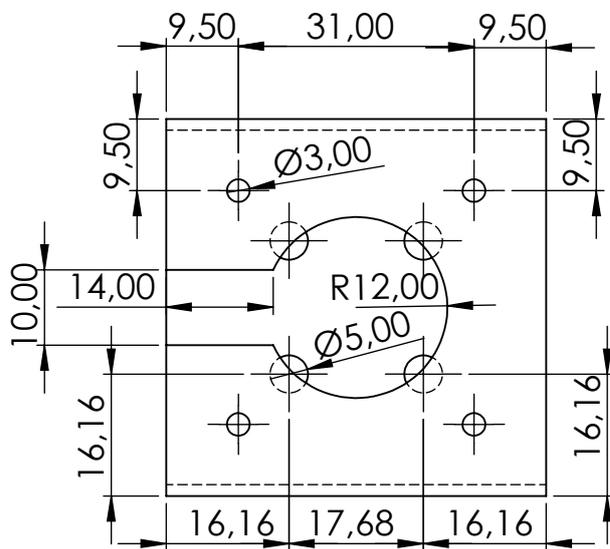
Junta 4 parte 2

Escala:
1:1

Unidade:
mm

Data
09/06/2019





Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

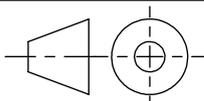
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

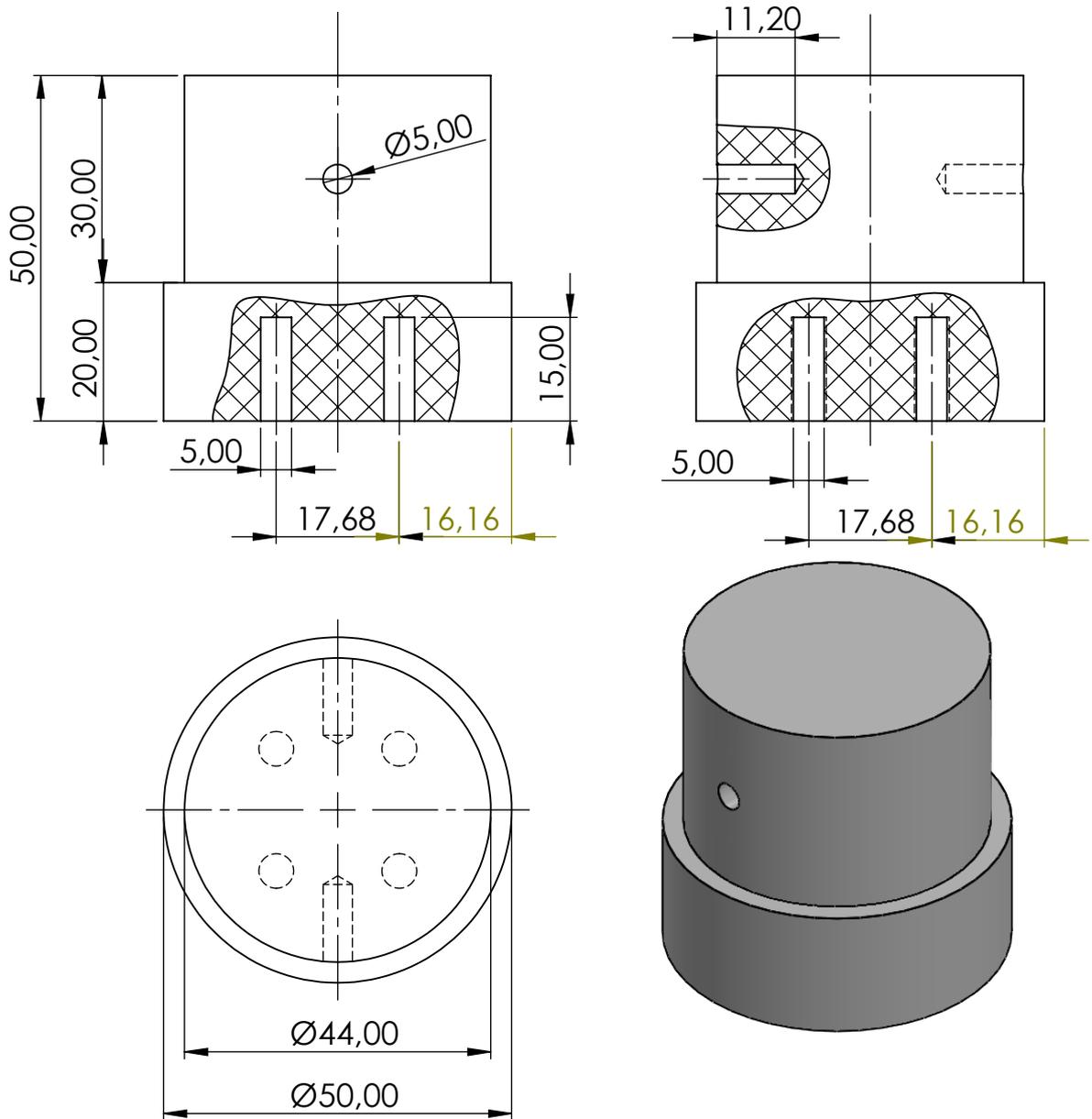
Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 22

Unidade:
mm



Junta 5



Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação 2

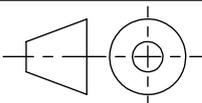
Escala:
1:1

Data
09/06/2019

Luiz Fernando M. de B. da Silva Néto

Folha 23

Unidade:
mm



Juntas Nylon

ANEXOS

| | | Pág. |
|-----------|--|------|
| Anexo I | Especificações Técnicas da Cadeira de Rodas Ortobras ULX | 164 |
| Anexo II | Catálogos dos Atuadores Seleccionados | 166 |
| Anexo III | Catálogos dos Rolamentos Seleccionados | 170 |

Tabela 27- Especificações Técnicas Ortobras ULX (Ortobras, 2018).

| Especificações Técnicas | |
|--|----------------------------------|
| Tipo de Quadro | Fechamento em Duplo X |
| Registro ANVISA | 80118040002 |
| Classificação de Risco | I-Baixo Risco |
| Peso | 16 kg |
| Material do quadro | Alumínio |
| Capacidade | 120 kg |
| Dimensão da caixa | L 320 x C 780 x A 900 |
| Larguras do assento | 36/38/40/42/44/46/48/50/56/60 cm |
| Profundidades do assento | 35/40/45/50 cm |
| Alturas do encosto | 35/40/45/50 cm |
| Altura dianteira do assento ao piso | 50 cm |
| Altura traseira do assento ao piso | 48 cm |
| Regulagem do apoio de pés | de 40 cm a 48 cm |
| Ângulos de ajuste do encosto | N/A |
| Cambagem | N/A |
| Ajuste do Centro de Gravidade | -5cm / 0cm / 5cm |
| Variação do Tilt | 46 cm/ 48 cm/ 50 cm |
| Rodas Dianteiras | 6" Maciça |
| Apoio de pés | Fixo 60° Swing-Away Desmontável |
| Pedal | Fixo |
| Eixo Traseiro | Desmontável |
| Eixo Dianteiro | Desmontável |
| Roda Traseira | 24" Raiada |

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Pneu da Roda Traseira | Infável 24"x 1 3/8" |
| Aro de impulso | Alumínio Anodizado |
| Suspensão | N/A |
| Tipo do Encosto | Fixo |
| Opções de Encosto | N/A |
| Estofamento de Encosto | Nylon Acolchoado |
| Apoio de Braço | Rebatível |



Figura 107 - Cadeira de Rodas Ortobras ULX (Ortobras, 2018).

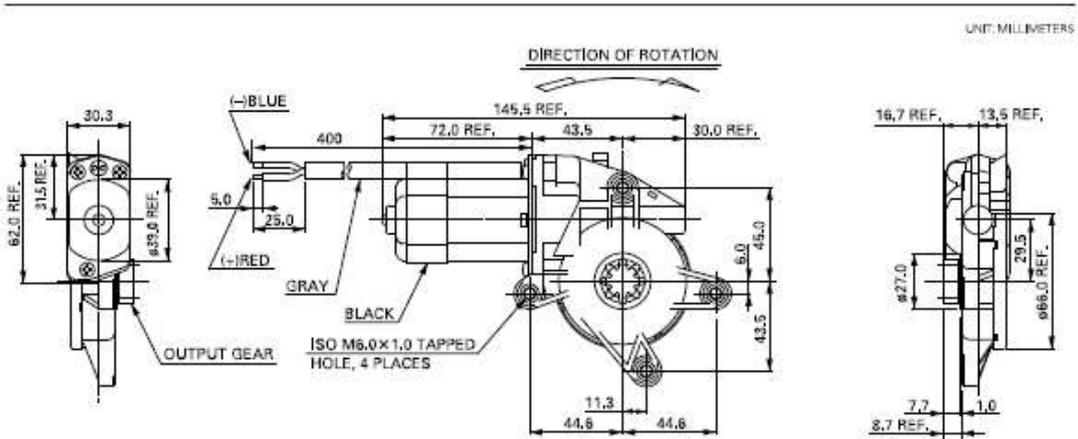
MABUCHI MOTOR **JC/LC-578VA** (Powerwindow-lift motors)

Typical Applications Automotive Products : Power Window Lifter

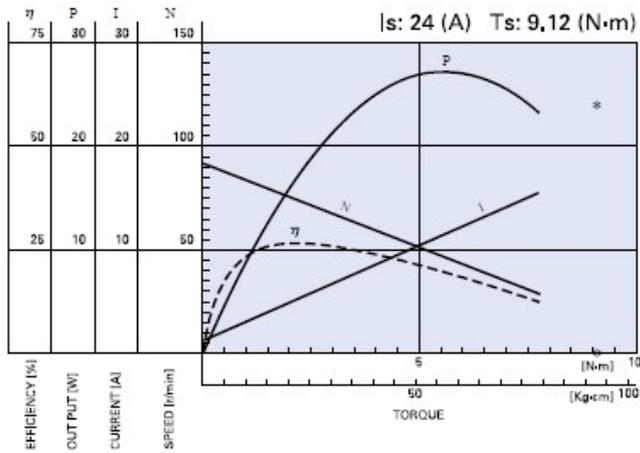


Distinctive Features

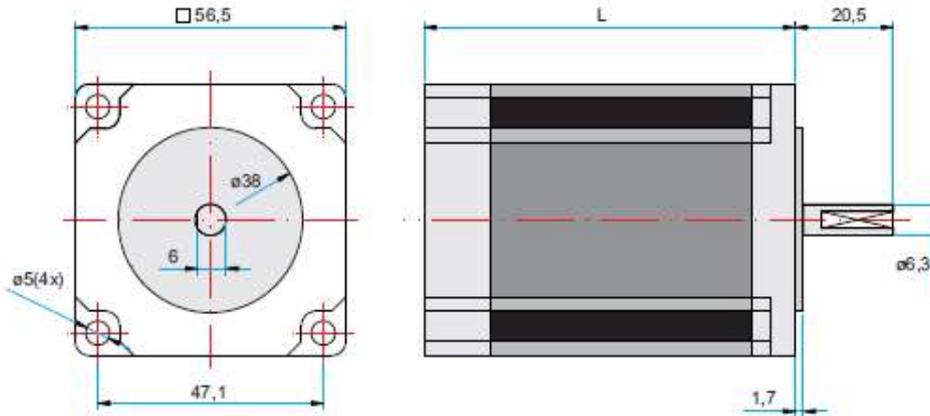
- The drive motor is designed to be the compact sized motor offered for power window applications, measuring 29mm thick and 39mm across the diameter.
- This motor is designed with water proof construction.



JC/LC-578VA-4720 12,0V

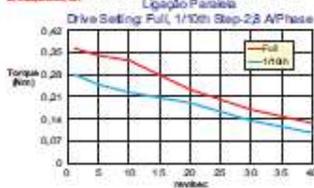


MOTOR DE PASSO KTC-HT23 / NEMA 23

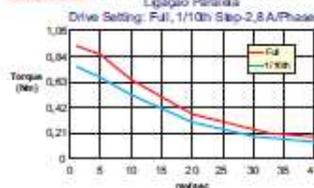


| MODELO | LIGAÇÃO DO MOTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNICLAR | COMPRIMENTO "L" (mm) | MÍNIMO TORQUE ESTÁTICO (N.m) | POIS | STEP (ÂNGULO) | VOLTS | AMPS | OHMS | mH | ROTOR INÉRCIA (g-cm ²) | MOTOR PESO (kg) |
|--------------|--|-------------------------|------------------------------|------|---------------|-------|------|------|------|------------------------------------|-----------------|
| KTC-HT23-394 | 1 | 40,8 | 0,54 | B | 1,8 | 4,0 | 1,41 | 2,8 | 5,6 | 120 | 0,45 |
| | 2 | | | | | 2,0 | 2,38 | 0,7 | 1,4 | | |
| | 3 | | | | | 2,8 | 2,00 | 1,4 | 1,4 | | |
| KTC-HT23-397 | 1 | 59 | 1,25 | B | 1,8 | 5,1 | 1,41 | 3,6 | 10,0 | 300 | 0,69 |
| | 2 | | | | | 2,5 | 2,38 | 0,9 | 2,5 | | |
| | 3 | | | | | 3,6 | 2,00 | 1,8 | 2,5 | | |
| KTC-HT23-400 | 1 | 76 | 1,86 | B | 1,8 | 6,4 | 1,41 | 4,5 | 14,4 | 480 | 1,00 |
| | 2 | | | | | 3,2 | 2,38 | 1,1 | 3,6 | | |
| | 3 | | | | | 4,5 | 2,00 | 2,3 | 3,6 | | |
| KTC-HT23-401 | 1 | 76 | 1,86 | B | 1,8 | 4,2 | 2,12 | 2,0 | 6,4 | 480 | 1,00 |
| | 2 | | | | | 2,1 | 4,24 | 0,5 | 1,6 | | |
| | 3 | | | | | 3,0 | 3,00 | 1,0 | 1,6 | | |

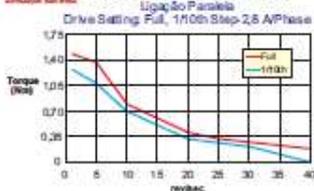
KALATEC KTC-HT23-394 MOTOR



KALATEC KTC-HT23-397 MOTOR



KALATEC KTC-HT23-400 MOTOR

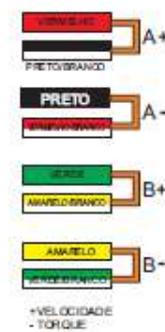


KALATEC KTC-HT23-401 MOTOR

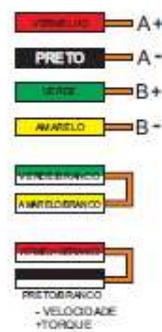


MOTORES

LIGAÇÃO PARALELA



LIGAÇÃO SÉRIE



1.8° 42mm Hybrid Stepper Motor-NEMA17



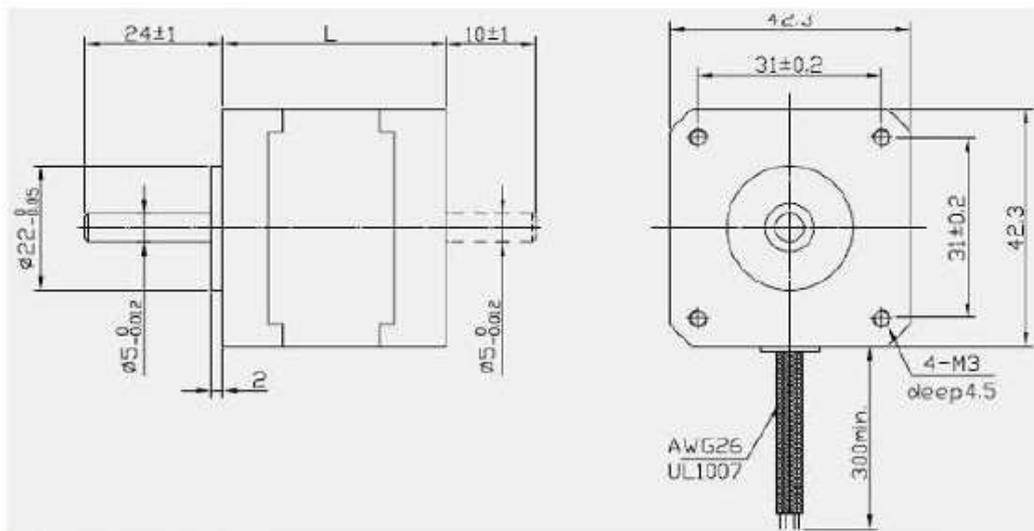
General Specification:

| Item | Specifications |
|-----------------------|----------------------------|
| Step Angle | 1.8° |
| Temperature Rise | 80°C max |
| Ambient Temperature | -20°C ~ +50°C |
| Insulation Resistance | 100 MΩ Min. ,500VDC |
| Dielectric Strength | 500VAC for 1minute |
| Shaft Radial Play | 0.02Max. (450g-load) |
| Shaft Axial Play | 0.08Max. (450g-load) |
| Max. radial force | 28N (20mm from the flange) |
| Max. axial force | 10N |

Electrical Specifications:

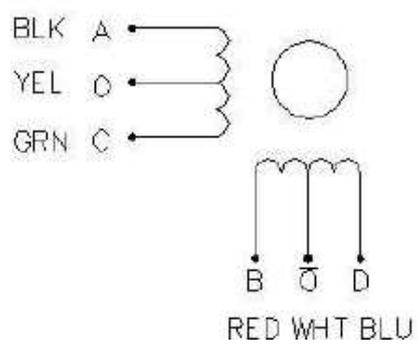
| Model No. | Step Angle | Motor Length | Current /Phase | Resistance /Phase | Inductance /Phase | Holding Torque | # of Leads | Detent Torque | Rotor Inertia | Mass |
|-------------|------------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|---------------|---------------|------|
| | (°) | (L)mm | A | Ω | mH | kg.cm | No. | g.cm | g.cm | Kg |
| 42HS34-0956 | 1.8 | 34 | 0.95 | 4.2 | 2.5 | 1.6 | 6 | 120 | 34 | 0.22 |
| 42HS34-0406 | 1.8 | 34 | 0.4 | 24 | 15 | 1.6 | 6 | 120 | 34 | 0.22 |
| 42HS34-0316 | 1.8 | 34 | 0.31 | 38.5 | 21 | 1.6 | 6 | 120 | 34 | 0.22 |
| 42HS34-1334 | 1.8 | 34 | 1.33 | 2.1 | 2.5 | 2.6 | 4 | 120 | 34 | 0.22 |
| 42HS34-0404 | 1.8 | 34 | 0.4 | 30 | 35 | 2.6 | 4 | 120 | 34 | 0.22 |
| 42HS40-0404 | 1.8 | 34 | 0.4 | 30 | 60 | 4.0 | 4 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS40-1206 | 1.8 | 40 | 1.2 | 3.3 | 3.2 | 2.8 | 6 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS40-0806 | 1.8 | 40 | 0.8 | 7.5 | 6.7 | 2.6 | 6 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS40-1704 | 1.8 | 40 | 1.7 | 1.65 | 3.2 | 4.0 | 4 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS40-0406 | 1.8 | 40 | 0.4 | 30 | 30 | 2.6 | 6 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS40-1684 | 1.8 | 40 | 1.68 | 1.65 | 3.2 | 4.0 | 4 | 150 | 54 | 0.28 |
| 42HS48-1206 | 1.8 | 48 | 1.2 | 3.3 | 2.8 | 3.17 | 6 | 260 | 68 | 0.35 |
| 42HS48-0806 | 1.8 | 48 | 0.8 | 7.5 | 6.3 | 3.17 | 6 | 260 | 68 | 0.35 |
| 42HS48-0406 | 1.8 | 48 | 0.4 | 30 | 25 | 3.17 | 6 | 260 | 68 | 0.35 |
| 42HS48-1684 | 1.8 | 48 | 1.68 | 1.65 | 2.8 | 4.4 | 4 | 260 | 68 | 0.35 |
| 42HS60-1206 | 1.8 | 60 | 1.2 | 6 | 7 | 6.5 | 6 | 280 | 102 | 0.5 |

Dimensions: (Unit=mm)

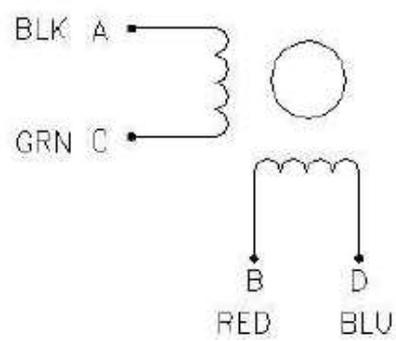


Wiring Diagram: (接线图)

6 LEADS



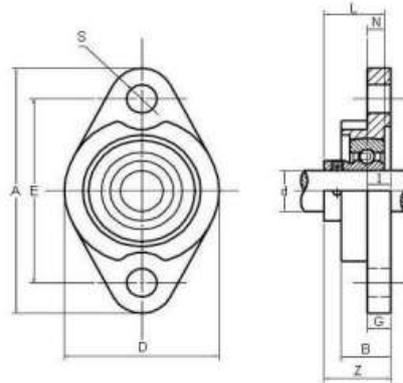
4 LEADS





KFL 000 - 2-Bolt Flanged Housing Series

Silver Series, rustproof zinc aluminium housing, high carbon chromium bearings, set screw locking, solid base.



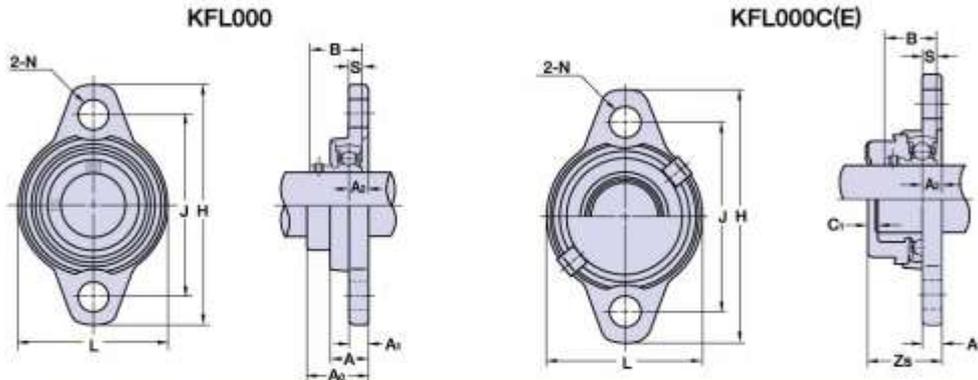
| Type | Dimensions (mm) | | | | | | | | | | | Bolt Size mm | Mass kg |
|---------|-----------------|-----|----|-----|-----|------|-----|----|------|------|-----|-----------------|------------|
| | d | A | E | I | G | B | S | D | Z | L | N | | |
| KFL 08 | 8 | 48 | 37 | 4,5 | 4,5 | 8,5 | 4,8 | 27 | 11,5 | 10,5 | 3,5 | M 4 | 0,08 |
| KFL 000 | 10 | 60 | 45 | 5,5 | 5,5 | 11,5 | 7 | 36 | 15,5 | 14,0 | 4,0 | M 6 | 0,10 |
| KFL 001 | 12 | 63 | 48 | 5,5 | 5,5 | 11,5 | 7 | 38 | 16,0 | 14,5 | 4,0 | M 6 | 0,10 |
| KFL 002 | 15 | 67 | 53 | 6,5 | 6,5 | 13,0 | 7 | 42 | 18,6 | 16,5 | 4,5 | M 6 | 0,10 |
| KFL 003 | 17 | 71 | 56 | 7,0 | 7,0 | 14,0 | 7 | 46 | 19,5 | 17,5 | 5,0 | M 6 | 0,20 |
| KFL 004 | 20 | 90 | 71 | 8,0 | 8,0 | 16,0 | 10 | 55 | 23,0 | 21,0 | 6,0 | M 8 | 0,20 |
| KFL 005 | 25 | 95 | 75 | 8,0 | 8,0 | 16,0 | 10 | 60 | 24,5 | 22,5 | 6,0 | M 8 | 0,20 |
| KFL 006 | 30 | 112 | 85 | 9,0 | 9,0 | 18,0 | 13 | 70 | 27,0 | 24,5 | 6,5 | M 10 | 0,30 |

Figura 108 - Catálogo PTI dos rolamentos seleccionados.

Two-bolt flange units Set-screw type

KFL000 type

KFL000C(E) type



| Shaft dia. (mm) | Unit No. | Dimensions (mm) | | | | | | | | | | | Mounting bolt size | |
|-----------------|----------|-----------------|----|----------------|----------------|------|----|----|----------------|------|-----|----------------|--------------------|----------------|
| | | H | J | A ₁ | A ₂ | A | N | L | A ₀ | B | S | C ₁ | | Z _s |
| 10 | KFL000 | 60 | 45 | 5.5 | 5.5 | 11.5 | 7 | 36 | 15.5 | 14 | 4 | 6 | 22 | M 6 |
| 12 | KFL001 | 63 | 48 | 5.5 | 5.5 | 11.5 | 7 | 38 | 16 | 14.5 | 4 | 5.5 | 22 | M 6 |
| 15 | KFL002 | 67 | 53 | 6.5 | 6.5 | 13 | 7 | 42 | 18.6 | 16.5 | 4.5 | 5 | 24 | M 6 |
| 17 | KFL003 | 71 | 56 | 7 | 7 | 14 | 7 | 46 | 19.5 | 17.5 | 5 | 6 | 26 | M 6 |
| 20 | KFL004 | 90 | 71 | 8 | 8 | 16 | 10 | 55 | 23 | 21 | 6 | 7.5 | 31 | M 8 |
| 25 | KFL005 | 95 | 75 | 8 | 8 | 16 | 10 | 60 | 24.5 | 22.5 | 6 | 7 | 32 | M 8 |
| 30 | KFL006 | 112 | 85 | 9 | 9 | 18 | 13 | 70 | 27 | 24.5 | 6.5 | 6.5 | 34 | M10 |

| Bearing No. | Bearing | | Housing No. | Unit No. with covers | Stainless steel cover No. | | Weight (g) | | |
|-------------|------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------------|---------|------------|--------|------------|
| | Basic load rating (kN) | | | | Open(closed) | Open | Closed | Normal | With cover |
| | C _r | C _{0r} | | | | | | | |
| K000 | 4.6 | 2 | FL000 | KFL000C(E) | 000CP10 | 000CPE | 50 | 55 | |
| K001 | 5.1 | 2.4 | FL001 | KFL001C(E) | 001CP12 | 001CPE | 70 | 74 | |
| K002 | 5.6 | 2.6 | FL002 | KFL002C(E) | 002CP15 | 002CPE | 90 | 95 | |
| K003 | 6 | 3.3 | FL003 | KFL003C(E) | 003CP17 | 003CPE | 115 | 121 | |
| K004 | 9.35 | 5.1 | FL04-5 | KFL004C(E) | 04-5CP20 | 04-5CPE | 190 | 200 | |
| K005 | 10.1 | 5.8 | FL05-6 | KFL005C(E) | 05-6CP25 | 05-6CPE | 220 | 231 | |
| K006 | 13.2 | 8.3 | FL06-7 | KFL006C(E) | 06-7CP30 | 06-7CPE | 340 | 356 | |

●Recommended tightening torque of set screws and axial load capacity

| Applicable bearing Nos. | Set-screw No. | Hexagon key No. | Tightening torque (N·m) | Axial load capacity (N) |
|-------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| K000, K001 | M3×0.35 | 1.5 | 0.59 | 350 |
| K002, K003 | M4×0.5 | 2 | 1.47 | 430 |
| K004~K006 | M5×0.5 | 2.5 | 2.94 | 720 |

Figura 109- Catálogo ASAHI dos rolamentos selecionados.