

# isec

## Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA

DEFINITIVO

**Projeto e Desenvolvimento de  
Equipamentos Mecânicos na Empresa  
Matechnics**

Autor

**André Seabra Duarte**

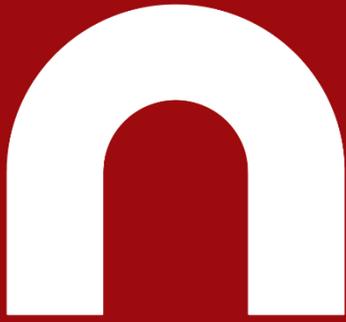
Orientador

**Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego**

INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA

Coimbra, novembro de 2022



# isec

## Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

### **Projeto e Desenvolvimento de Equipamentos Mecânicos na Empresa Matechnics**

Relatório de Estágio de Natureza Profissional para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

**André Seabra Duarte**

Orientador

**Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego**

Supervisor na empresa      Matechnics, Lda

**Engenheiro Jorge Manuel Rodrigues de Almeida**

INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA

Coimbra, novembro de 2022

## AGRADECIMENTOS

O presente Relatório apresentado apenas foi exequível graças à colaboração de várias pessoas, por isso, a todas elas, quero manifestar os meus agradecimentos.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Matechnics e a todos os seus membros integrantes e colaboradores, pelo acolhimento desde o início e por ter proporcionado todas as condições para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Jorge Almeida, pela orientação, transmissão de ensinamentos e conhecimentos ao longo do trabalho.

Ao Eng. Juvêncio Reis, Eng. Fábio Soares e Eng. Vítor Costa, pela orientação, por todos os conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade e apoio prestado ao longo do estágio.

Ao Sr. Paulo Barreira, pela disponibilidade e prontificação para troca de ideias e esclarecimento de dúvidas.

Ao Prof. Doutor Luís Borrego pela disponibilidade e orientação prestada na elaboração deste trabalho, mas, também, pela transmissão de conhecimentos ao longo do meu percurso pelo ISEC.

Aos meus pais e família chegada pelo orgulho e encorajamento demonstrado, por possibilitarem realizar todo o meu percurso académico e pelo apoio incondicional, criando assim, sempre, as melhores condições para o meu sucesso.

À minha namorada por sempre me ter apoiado, pela paciência e compreensão demonstrada para comigo e pela ajuda prestada durante a realização do estágio e relatório de estágio mesmo que, para isso, tenha tido de abdicar de alguns fins de semana e feriados. E claro pelo carinho e amor.

Aos meus amigos pelo apoio e compreensão que sempre demonstraram e também, pelos momentos de companhia vividos ao longo dos cinco anos de formação académica.

Para finalizar agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o sucesso da minha formação académica.

## RESUMO

No âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, área de especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos e Sistemas Mecânicos, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, realizou-se um estágio curricular na empresa Matechnics. Esta empresa dedica-se ao projeto e construção de soluções na área de automação, robótica e à prestação de serviços de manutenção industrial e eletricidade. O estágio realizado inseriu-se no departamento técnico, nomeadamente na área de projeto mecânico dos equipamentos que desenvolve.

O presente relatório de estágio apresenta a descrição de alguns processos de fabrico utilizados no estágio, nomeadamente o torneamento no torno convencional e a fresagem em centros de maquinagem, alguns projetos desenvolvidos na empresa, tais como, uma flange de ligação entre uma bomba hidráulica e um motor, um dispositivo elevatório de tampa de um reservatório cilíndrico e bomba hidráulica, uma garra manipuladora para transporte de válvulas, uma maquete 3D de uma estufa de alívio de tensões residuais bem como, descrição da tecnologia utilizada e um degasificador de resina. Este relatório visa, essencialmente, a descrição do projeto, o desenho e o desenvolvimento de todos os componentes desenvolvidos associados ao estágio curricular realizado. Também faz alusão a estudos numéricos realizados, dos esforços exercidos em alguns dos componentes elaborados. Os estudos numéricos realizaram-se através da ferramenta de simulação por elementos finitos do software *Solidworks*®. A partir destes estudos podem ser calculadas as tensões máximas exercidas e os deslocamentos a que os componentes estão sujeitos.

**Palavras-Chave:** processos de fabrico, projeto mecânico, desenho assistido por computador, estudo de elementos finitos, análise estrutural.

## ABSTRACT

As part of the Master's degree in Mechanical Engineering, area of specialization in Construction and Maintenance of Mechanical Equipment and Systems, at the Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, a curricular internship was carried out at the company Matechnics. This company is dedicated to the design and construction of solutions in the area of automation, robotics and the provision of industrial maintenance and electricity services. The internship took place in the technical department, namely in the area of mechanical design of the components that are developed.

This internship report presents the description of some manufacturing processes used in the internship, namely the turning on the conventional lathe and milling in machining centers, some projects developed in the company, such as a connection flange between a hydraulic pump and a motor, a lifting device of a cylindrical reservoir lid and hydraulic pump, a manipulator grip for transporting valves, a 3D model of a residual strain relief oven as well as a description of the technology used and a resin degasser. This report essentially aims at the description of project, design and development of all the components developed associated with the curricular internship carried out. It also alludes to numerical studies performed, of the efforts exerted in some of the components elaborated. Numerical studies were carried out through the finite element simulation tool of *Solidworks*® software. From these studies, the maximum stresses exerted and the displacements to which the components are subject can be calculated.

**Keywords:** manufacturing processes, mechanical project, computer aided design, finite element study, structural analysis.

## **ÍNDICE**

|  |     |
|--|-----|
| <b>RESUMO</b> .....  | ii  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | iii |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....   | v   |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....   | ix  |
| <b>SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS</b> .....   | x   |
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....   | 1   |
| <b>CAPÍTULO 2 - A EMPRESA</b> .....  | 2   |
| <b>CAPÍTULO 3 – PROCESSOS DE FABRICO MAIS UTILIZADOS NO ESTÁGIO</b> .....                        | 4   |
| <b>3.1 – Torneamento (Em Torno Convencional)</b> .....   | 4   |
| <b>3.2 – Fresamento (Nos Centros de Maquinagem)</b> .....  | 9   |
| <b>CAPÍTULO 4 – PROJETOS DESENVOLVIDOS</b> .....   | 15  |
| <b>4.1 - Flange de Ligação Entre um Motor e uma Bomba Hidráulica</b> .....                       | 15  |
| <b>4.2 – Dispositivo Elevatório de Tampa de Reservatório Cilíndrico e Bomba Hidráulica</b> ..... | 19  |
| <b>4.3 – Garra Manipuladora para Robô</b> .....  | 28  |
| <b>4.4 – Elaboração de Maquete 3D e Descrição da Tecnologia Utilizada</b> .....                  | 47  |
| <b>4.5 – Desgasificador de Resina</b> .....  | 56  |
| <b>CAPÍTULO 5 – ESTUDO CAE (COMPUTER AIDED ENGINEERING)</b> .....                                | 61  |
| <b>5.1 – Introdução</b> .....  | 61  |
| <b>5.2 – Considerações Gerais</b> .....  | 62  |
| <b>5.2.1 – Garra Manipuladora para Robô</b> .....  | 62  |
| <b>5.2.2 – Propriedades Mecânicas dos Materiais</b> .....  | 63  |
| <b>5.2.3 – Restrições e Solicitações Aplicadas no Estudo</b> .....                               | 63  |
| <b>5.2.4 – Estudo de Convergência de Malha</b> .....   | 69  |
| <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 72  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | 74  |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Logotipo Matechnics. Imagem adaptada de (Matechnics, 2022a).   | 2  |
| Figura 2 - Sede da Matechnics.  | 2  |
| Figura 3 - Onde a Matechnics atua. Imagem adaptada de (Matechnics, 2022b).  | 3  |
| Figura 4 - Representação do processo tecnológico de corte por arranque de apana efetuado num torno convencional. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).                             | 4  |
| Figura 5 - Operações possíveis de realizar num torno convencional e forma de atuação das respetivas ferramentas. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).                             | 5  |
| Figura 6 - Operações possíveis de realizar num torno convencional e forma de atuação das respetivas ferramentas. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).                             | 5  |
| Figura 7 – Representação esquemática de um torno paralelo, componentes e movimentos típicos. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).   | 6  |
| Figura 8 - Velocidades de corte para desbaste e acabamento para ferramentas em aço rápido (ao Co) para diferentes materiais a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a). | 7  |
| Figura 9 - Velocidade de rotação no torno para material Ck45 em função da velocidade de corte e do diâmetro da peça a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a).         | 8  |
| Figura 10 - Velocidade de rotação no torno para material Ck45 em função da velocidade de corte e do diâmetro da peça a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a).        | 8  |
| Figura 11 - Substituição automática das ferramentas num centro de maquinagem. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).  | 9  |
| Figura 12 - Centros de maquinagem de 5 eixos. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).  | 10 |
| Figura 13 - Centro de maquinagem de 3 eixos. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).   | 10 |
| Figura 14 - Representação de dois processos de fresamento para obtenção de superfícies. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).  | 12 |
| Figura 15 - Movimentos de fresamento. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).  | 12 |
| Figura 16 - Características do corte concordante e discordante. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).  | 13 |
| Figura 17 - Movimentos na operação de fresamento. Imagem adaptada de (Relvas, 2002).  | 13 |
| Figura 18 - Protótipo da flange a desenvolver.  | 15 |
| Figura 19 - Abertura de furo para remoção de material interior através de serrote de fita.  | 16 |
| Figura 20 – a) Geometria a maquinar; b) matéria-prima a aproveitar.   | 16 |
| Figura 21 - Aperto da geometria a maquinar num torno convencional.  | 17 |
| Figura 22 - Geometria final da flange desenvolvida.   | 17 |
| Figura 23 - Dimensões da flange desenvolvida.   | 18 |
| Figura 24 - Montagem dos componentes: Motor; Flange; Bomba Hidráulica.  | 18 |
| Figura 25 - Modificação efetuada na tampa do reservatório.  | 19 |
| Figura 26 - Esquematização do problema.   | 19 |
| Figura 27 - Esquema da elevação da tampa e bomba hidráulica acopladas para substituição do reservatório.  | 20 |
| Figura 28 – Abraçadeira.  | 20 |
| Figura 29 – a) Perfis quadrados; b) Placas de Nylon.  | 21 |
| Figura 30 – a) Base de assento do cilindro; b) Fixação através de parafusos DIN 912 M6.   | 22 |
| Figura 31 - Tampa da extremidade do perfil interior.  | 22 |
| Figura 32 - Componente de ligação entre a bomba hidráulica e a tampa do reservatório.   | 23 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 33 - Componente de ligação entre perfil UPN 100 e componente de ligação entre a bomba hidráulica e a tampa do reservatório. ....</b>   | <b>23</b> |
| <b>Figura 34 - Perfil UPN 100 e respectivas modificações efetuadas. ....</b>   | <b>23</b> |
| <b>Figura 35 - Conjunto elevatório. ....</b>   | <b>24</b> |
| <b>Figura 36 - Base de assento do conjunto elevatório. ....</b>  | <b>25</b> |
| <b>Figura 37 - a) Assemblagem entre conjunto elevatório e base; b) Solda de dois perfis quadrados 50x50mm à base e ao conjunto elevatório para conferir rigidez. ....</b>  | <b>25</b> |
| <b>Figura 38 - Janela de acesso do perfil interior e acoplamento da haste do cilindro à tampa do conjunto elevatório. ....</b>   | <b>26</b> |
| <b>Figura 39 - Janela do perfil exterior. ....</b>   | <b>26</b> |
| <b>Figura 40 - Porta para observação do nível de fluído no interior do reservatório. ....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Figura 41 - Montagem final do dispositivo e funcionamento do mesmo. ....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Figura 42 - Garra manipuladora. ....</b>  | <b>28</b> |
| <b>Figura 43 – Válvulas. ....</b>  | <b>29</b> |
| <b>Figura 44 - Válvula de maiores dimensões. ....</b>  | <b>29</b> |
| <b>Figura 45 - Robô ABB IRB 6700. ....</b>   | <b>30</b> |
| <b>Figura 46 - Flange do braço do robô. ....</b>   | <b>31</b> |
| <b>Figura 47 - Flange criada para acoplar o gripper ao robô. ....</b>  | <b>31</b> |
| <b>Figura 48 - Componente de ligação à flange desenvolvida e que suporta dois braços de maiores dimensões (ligante). ....</b>  | <b>32</b> |
| <b>Figura 49 - Braço de maiores dimensões e caraterísticas geométricas. ....</b>   | <b>32</b> |
| <b>Figura 50 – Garra. ....</b>   | <b>33</b> |
| <b>Figura 51 - Braço de menores dimensões e caraterísticas geométricas. ....</b>   | <b>34</b> |
| <b>Figura 52 - Motoredutor Nord® de rosca sem fim SK 1S150F – IEC63 – 63SP4. Imagem adaptada de (Nord, 2022). ....</b>   | <b>34</b> |
| <b>Figura 53 - Especificações técnicas do motoredutor Nord® de rosca sem fim SK 1S150F – IEC63 – 63SP4. Imagem adaptada de (Nord, 2022). ....</b>  | <b>35</b> |
| <b>Figura 54 – Flange de suporte do motoredutor e caraterísticas geométricas. ....</b>   | <b>35</b> |
| <b>Figura 55 - Parafuso sem-fim M24. ....</b>  | <b>36</b> |
| <b>Figura 56 - Componente que assegura que o parafuso sem-fim não caia nem suba pelo bloco do motoredutor. ....</b>  | <b>37</b> |
| <b>Figura 57 - Rolamento SKF® 51204. Imagem adaptada de (SKF, 2022). ....</b>  | <b>37</b> |
| <b>Figura 58 - Acoplamento dos componentes das Figuras 47, 52, 54, 55, 56 e 57. ....</b>   | <b>37</b> |
| <b>Figura 59 - Porca trapezoidal ISO conforme DIN 103 em bronze. ....</b>  | <b>38</b> |
| <b>Figura 60 - Entalhe realizado na geometria da porca ilustrada na Figura 59. ....</b>  | <b>38</b> |
| <b>Figura 61 - Componente de alojamento da porca referida na Figura 60 e de acoplamento aos braços de menores dimensões. ....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Figura 62 - Tampa para retenção da porca M24 dentro do componente da Figura 61. ....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Figura 63 – a) Conexão da flange do gripper à flange do robô; b) Conexão dos ligantes à flange do gripper; c) Conexão do braço de maiores dimensões aos ligantes. ....</b>  | <b>40</b> |
| <b>Figura 64 – a) Conexão da garra aos braços de maiores dimensões; b) Conexão do motoredutor à flange de suporte do mesmo; c) Conexão do escatel e do componente que assegura que o parafuso sem-fim não cai nem sobe pelo bloco do motoredutor ao parafuso sem-fim e rolamento a este componente. ....</b> | <b>40</b> |
| <b>Figura 65 – a) Conexão da flange de suporte do motoredutor à flange do gripper; b) Conexão da porca ao componente de alojamento da mesma e à tampa e cavilha. ....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Figura 66 – a) Conexão do componente de alojamento da porca ao parafuso sem-fim; b) Conexão do braço de menores dimensões ao componente de alojamento da porca e à garra. ....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Figura 67 - Geometria final do gripper. ....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Figura 68 - Massa do conjunto (gripper e válvula de maiores dimensões) e centro de gravidade. ....</b>  | <b>42</b> |

|   |    |
|---|----|
| Figura 69 - Localização do centro de gravidade. ....  | 43 |
| Figura 70 – Validação da capacidade de carga do robô. Imagem adaptada de (ABB, 2022). ....  | 44 |
| Figura 71 - Maquinação de alguns componentes que constituem o gripper. ....   | 45 |
| Figura 72 - Pós-Maquinação de alguns componentes que constituem o gripper. ....   | 45 |
| Figura 73 - Gripper (garra manipuladora) acoplada a um robô para ensaio. ....   | 46 |
| Figura 74 - Estufa de alívio de tensões residuais. ....   | 47 |
| Figura 75 - Módulos em que se dividiu a estufa de alívio de tensões residuais. ....   | 48 |
| Figura 76 - Impressão do módulo do armário. ....  | 49 |
| Figura 77 – a) Módulo das barreiras de proteção; b) Estufa; c) Mesa de alimentação e extração. ...  | 49 |
| Figura 78 - Montagem final da maquete. ....   | 50 |
| Figura 79 - Esquema de um equipamento de FDM. Imagem adaptada de (Ferretti, 2016). ....   | 52 |
| Figura 80 - Alimentação de filamento num bico extrusor e deposição de material. Imagem adaptada de (Ferretti, 2016). ....   | 52 |
| Figura 81 - Modelação 3D CAD do produto a ser prototipado. ....   | 53 |
| Figura 82 - Gravar o modelo em extensão .STL. ....  | 53 |
| Figura 83 - Abertura do software após a máquina FDM ter sido ligada. ....   | 54 |
| Figura 84 - Abertura do arquivo .STL. ....  | 54 |
| Figura 85 - Definição da orientação de produção do modelo. ....   | 54 |
| Figura 86 - Processamento do modelo. ....   | 55 |
| Figura 87 - Ordem de impressão do modelo, após verificação da posição de produção da peça e dos parâmetros de construção. ....  | 55 |
| Figura 88 - Reorganização do posicionamento dos componentes constituintes do equipamento. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual. ....      | 56 |
| Figura 89 - Alterações ao nível da estrutura. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual. ....  | 56 |
| Figura 90 - Substituição do registo de observação do nível de resina por células de carga. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual. ....     | 57 |
| Figura 91 - Substituição dos painéis fixos por ligações aparafusadas por uns de engate rápido. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual. .... | 57 |
| Figura 92 - Comparação entre as duas versões finais do equipamento. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual. ....                            | 58 |
| Figura 93 - Esquema geral do desgasificador de resina. ....   | 59 |
| Figura 94 - Interior do equipamento (desgasificador de resina). ....  | 60 |
| Figura 95 - Montagem final do desgasificador de resina. ....  | 60 |
| Figura 96 - Elemento SOLID. Imagem adaptada de (Systèmes, 2019). ....   | 61 |
| Figura 97 - Modelo utilizado no estudo. ....  | 63 |
| Figura 98 - Utilização do comando Fixed Geometry no modelo em estudo. ....  | 64 |
| Figura 99 - Criação de um eixo no centro do modelo e paralelo à orientação do parafuso sem-fim. ....  | 64 |
| Figura 100 - Utilização do comando Cyclic Geometry no modelo em estudo. ....  | 65 |
| Figura 101 - Condição global utilizada no modelo em estudo. ....  | 65 |
| Figura 102 - Utilização de contacto Bonded entre os componentes, parafuso sem-fim, porca e suporte de rolamento. ....   | 66 |
| Figura 103 - Utilização do comando Rigid Connector no modelo em estudo. ....  | 66 |
| Figura 104 - Pinos virtuais aplicados no modelo em estudo. ....   | 67 |
| Figura 105 - Aplicação da carga na garra. ....  | 68 |
| Figura 106 - Modelo totalmente restringido e solicitado. ....   | 68 |
| Figura 107 - Representação Solidworks® da distribuição de malha na peça. ....   | 69 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 108 - Elemento tetraédrico de segunda ordem. Imagem adaptada de (Roseiro e Maranhã, 2020).</b> ..... | 70 |
| <b>Figura 109 - Gráfico de convergência de malha do modelo em estudo.</b> .....                                | 71 |
| <b>Figura 110 - a) tensão Von Mises máxima obtida; b) Deslocamento máximo obtido.</b> .....                    | 71 |

## ÍNDICE DE TABELAS

**Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no gripper.....42**

**Tabela 2 - Dados obtidos para os diferentes tamanhos de malha. ....70**

## **SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS**

$\sigma_{ced}$  – Tensão de Cedência

$\sigma_R$  – Tensão de Rotura / Tensão Máxima

$\mu$  – Coeficiente de Poisson

$\epsilon_R$  – Deformação de Rotura

ABS – Acrilonitrila-Butadieno-Estireno

CAE – Computer Aided Engeneering / Engenharia Assistida por Computador

CAD – Computer Aided Drawing / Desenho Assistido por Computador

CAM – Computer Aided Manufacturing / Fabrico Assistido por Computador

CM – Centro de Maquinagem

CNC – Controlo Numérico Computadorizado

DOF – Degrees Of Freedom / Graus de Liberdade

E – Módulo de Elasticidade

F – Força

FEA – Finite Element Analysis / Análise por Elementos Finitos

FEM – Finite Element Method / Método de Elementos Finitos

FDM – Fused Deposition Modeling / Modelação por Fusão e Deposição

G – Módulo de Cisalhamento

HB – Dureza Brinell

MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas

PLA – Poliacido Láctico

PME – Pequena Média Empresa

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

Atualmente, verifica-se uma crescente e abrangente competitividade vivida no meio industrial em todos os tipos de indústria, as empresas procuram aperfeiçoar o desempenho dos seus processos de maneira a solidificarem a sua posição no mercado. Na Matechnics este conceito não é exceção, deste modo, o presente relatório está vocacionado para um objetivo muito concreto: desenvolvimento de soluções e componentes capazes de satisfazer as necessidades dos clientes com o máximo desempenho e qualidade possível.

O estágio realizado consistiu no projeto mecânico de várias soluções industriais, desenvolvendo assim, alguns dispositivos e componentes. Além da parte de desenho, realizou-se também cálculos analíticos e numéricos para validação de alguns dos componentes desenvolvidos.

De acordo com a carência identificada pelos clientes nas suas empresas e as suas necessidades, aplicaram-se conceitos por forma a atingir o objetivo de desenvolver soluções e componentes capazes de satisfazer as suas necessidades, dotadas de tecnologia atual e económica sem nunca comprometer a qualidade das mesmas.

Outro dos objetivos da realização do estágio era proporcionar a consolidação da formação académica e desenvolver capacidades técnicas e profissionais em contexto real de trabalho em ambiente fabril, através da integração nas atividades da empresa Matechnics.

Este estágio foi integrado no departamento de projeto mecânico, área de desenho técnico, com o objetivo de desenvolver novos equipamentos e alterar outros existentes de maneira a melhorar o desempenho e/ou a produtividade dos já existentes.

O presente relatório está estruturado em seis capítulos distintos: primeiro, este, a introdução, segundo, uma descrição da empresa onde o estágio se realizou, terceiro, são descritos os principais processos de fabrico mais utilizados para obtenção de geometrias sólidas aplicadas nos projetos desenvolvidos, nomeadamente o torneamento no torno convencional e a fresagem nos centros de maquinagem, quarto, é feita a descrição do desenvolvimento dos vários projetos elaborados no estágio, quinto, cálculos analíticos e computacionais de algumas geometrias constituintes desses projetos e por fim, sexto, conclusão e perspetivas futuras.

Note-se que a descrição de alguns equipamentos, bem como o funcionamento das linhas onde estão inseridos não são do conhecimento técnico geral, existindo, assim, confidencialidade industrial em torno deste tema, portanto, foi necessário ter algum cuidado na sua abordagem ao longo do relatório. Assim, a descrição destes componentes e do meio onde se encontram inseridos foram descritos apenas com a profundidade necessária para a compreensão do leitor.

## CAPÍTULO 2 - A EMPRESA

A Matechnics – Master Technology Solutions, Lda (Figura 1) (registada como Matecnic®), foi fundada a 25 de fevereiro de 2016 como resultado da determinação e empenho de três colegas de trabalho (Abimota, 2021), que decidiram criar a sua própria empresa e encontra-se sediada em Oiã, na Rua do Facho (Figura 2). Dedicase ao projeto e construção de soluções na área de automação robótica e à prestação de serviços de manutenção industrial e eletricidade.



Figura 1 - Logotipo Matechnics. Imagem adaptada de (Matechnics, 2022a).



Figura 2 - Sede da Matechnics.

O principal objetivo da empresa é criar produtos inovadores, recorrendo às tecnologias mais atuais existentes no mercado, de forma a acrescentar ou criar valor para o cliente e assim possibilitá-lo de melhores e maiores níveis de produtividade (Matechnics, 2022a).

Através da experiência adquirida pelos membros integrantes da Matechnics, bem como a sua polivalência, a empresa tem capacidade para projetar e produzir equipamentos para indústrias, como por exemplo:

- Automação de processos produtivos;
- Células robotizadas;
- Equipamentos para tratamento de superfícies e de pintura;
- Dosagem e mistura de componentes;

- Tratamento e filtração de ar;
- Estufas, fornos, secadores, entre outros.

Como orientações estratégicas, na Matechnics, a missão é, dar resposta às necessidades dos clientes e convertê-las em projetos inovadores e diferenciados dos demais para assim alimentar a competitividade do ramo e também, ter espaço de manobra para oferecer soluções exclusivas e personalizadas, ajustadas às especificações de cada projeto e às carências dos clientes. A visão traduz-se por querer ser parceiro estratégico pela inovação, flexibilidade, qualidade e capacidade técnica e humana. Os valores da empresa caracterizam-se pela ética e profissionalismo, respeito, quer seja para com os clientes quer para com as demais partes interessadas, credibilidade e desenvolvimento sustentável.

A Matechnics atua em várias áreas, destacando-se a automação industrial, soluções de robótica e a industrialização de processos.

- **Automação industrial** – utilização da tecnologia para facilitar o trabalho do ser humano, tendo por objetivo, tornar automático um processo produtivo, recorrendo à melhor solução técnico-económica;
- **Soluções de robótica** – utilização da tecnologia para tornar os processos produtivos mais rápidos e económicos;
- **Industrialização de processos** – inovação tecnológica de processos produtivos, recorrendo à automação e/ou robótica para tornar mais rentável a atividade industrial.

A Matechnics atua principalmente nas indústrias automóveis, cerâmicas, compósitos, eólicas, mobiliárias e náuticas, podendo, no entanto, atuar noutros tipos de indústrias.

De destacar que a Matechnics atingiu a categoria de PME (Pequena e Média Empresa) líder e excelência por três anos consecutivos, desde 2019 até 2021.

Atualmente a empresa atua a nível global conforme se pode observar na Figura 3, dando maior destaque para a grande atuação a nível europeu.



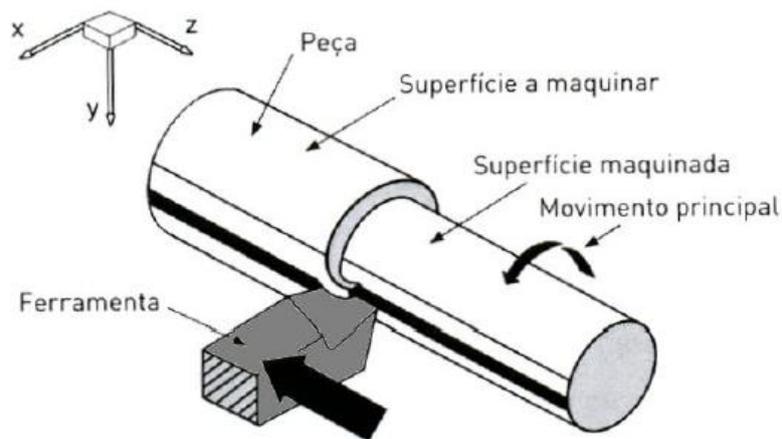
Figura 3 - Onde a Matechnics atua. Imagem adaptada de (Matechnics, 2022b).

## CAPÍTULO 3 – PROCESSOS DE FABRICO MAIS UTILIZADOS NO ESTÁGIO

### 3.1 – Torneamento (Em Torno Convencional)

Durante o decorrer do estágio curricular realizado, um dos processos de fabrico mais utilizados para maquinação dos componentes desenvolvidos foi o torneamento através do torno convencional ou, torno mecânico.

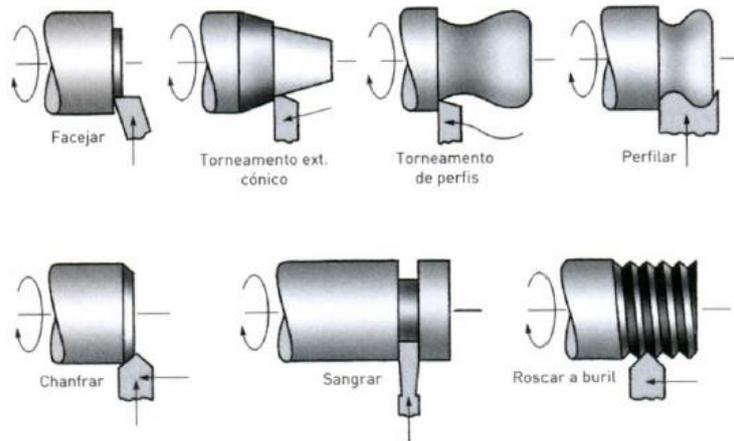
O torneamento, caracteriza-se por ser um processo tecnológico de corte por arranque de aparas, no qual a peça roda em torno do eixo da máquina (torno convencional) enquanto uma ferramenta de corte retira material da periferia, em simultâneo e, assim transforma-a na geometria pretendida (Completo *et al*, 2009), conforme está representado na Figura 4.



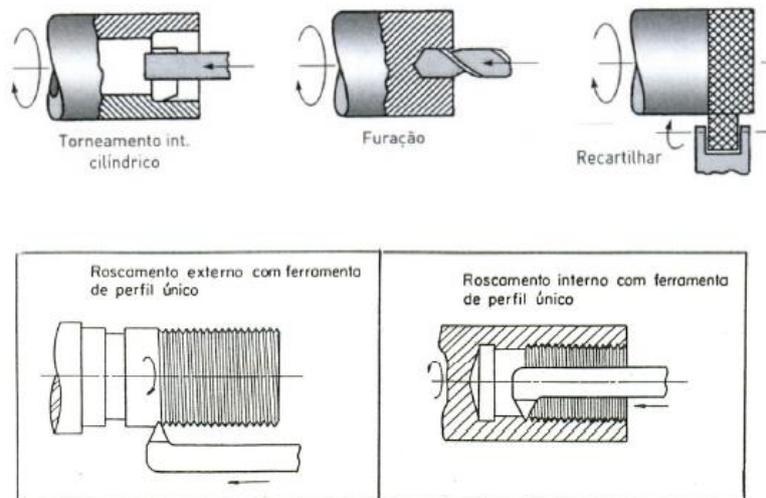
**Figura 4 - Representação do processo tecnológico de corte por arranque de aparas efetuado num torno convencional. Imagem adaptada de (Completo *et al*, 2009).**

Através deste processo de fabrico é possível obter superfícies planas, cónicas, cilíndricas, perfiladas ou não circunferencialmente, exteriores ou interiores. Além das operações mencionadas, é também, possível, efetuar furação e roscagem. As Figuras 5 e 6 ilustram as várias operações possíveis de realizar no torno, e também, a forma de atuação das respetivas ferramentas.

### Operação de Torneamento



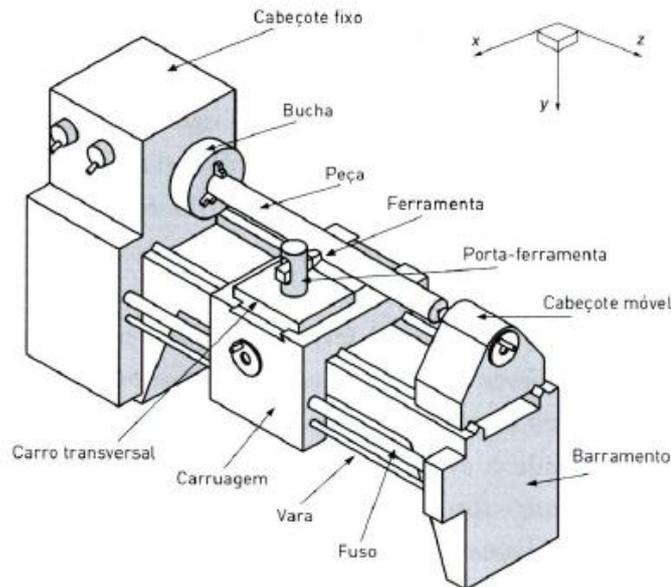
**Figura 5 - Operações possíveis de realizar num torno convencional e forma de atuação das respetivas ferramentas. Imagem adaptada de (Completo *et al*, 2009).**



**Figura 6 - Operações possíveis de realizar num torno convencional e forma de atuação das respetivas ferramentas. Imagem adaptada de (Completo *et al*, 2009).**

Na Figura 7 representa-se esquematicamente um torno paralelo (convencional) com os seus diversos componentes e movimentos típicos. Consiste num barramento onde estão assentados o cabeçote fixo, o cabeçote móvel e a carruagem/carro. A peça a maquinar, geralmente é apertada numa extremidade, pela bucha montada na árvore do torno e suportada na outra pelo contraponto. Para peças de menores dimensões, estas, fixam-se apenas, através da bucha.

## Torno paralelo



**Figura 7 – Representação esquemática de um torno paralelo, componentes e movimentos típicos. Imagem adaptada de (Completo *et al*, 2009).**

O principal movimento de corte é o da rotação da peça, proporcionado pela árvore, o movimento de avanço é dado pela ferramenta, a qual é montada no porta-ferramentas. Este movimento pode ser segundo o eixo Z, caso se trate de um torneamento cilíndrico exterior, no qual é o carro longitudinal que se desloca, ou, no sentido do eixo X, caso se trate de um facejamento, no qual é o carro transversal que se desloca. Também é possível efetuar o movimento combinado e em simultâneo de ambos os carros, por exemplo, para o torneamento em cópia. Nas operações de furação e roscagem com macho, o movimento de avanço é conferido à manga do contraponto.

Para se atingir as dimensões finais pretendidas na peça, a ferramenta pode ter de efetuar inúmeras passagens. A profundidade de corte resulta do ajustamento realizado entre cada passagem no sentido transversal. Para começar, efetua-se o desbaste nas primeiras passagens com o objetivo de se retirar volume de material à peça, recorrendo a elevadas velocidades de avanço e profundidades de corte. No final, dá-se um acabamento à peça, o qual, é obtido com uma velocidade de avanço e uma profundidade de corte mais pequenos.

Existem inúmeros acessórios que transformam os tornos em equipamentos extremamente versáteis, tais como, os sistemas de fixação de peças e ferramentas, as guias de acompanhamento e as ferramentas de corte.

Antes de se iniciar o torneamento é necessário definir os parâmetros de corte, parâmetros esses que são, a velocidade de corte, a velocidade de rotação da árvore, a velocidade de avanço e o penetramento ou profundidade de passagem.

Resumidamente, designa-se velocidade de corte, a velocidade tangencial, ou seja, é o espaço que um ponto imaginário percorre à superfície durante uma unidade de tempo e é um parâmetro que depende do diâmetro a toronar e da velocidade de rotação do torno. Esta velocidade é selecionada em função da ferramenta de corte, do material a maquinar e da operação a ser efetuada. Em relação às ferramentas de corte, os fabricantes fornecem dados de corte, os quais são obtidos experimentalmente, para a maquinação dos diversos materiais, dando também informação sobre as velocidades de corte para cada umas das operações (desbaste, acabamento, roscagem, etc.). A velocidade de rotação é o número de voltas que a árvore do torno dá por unidade de tempo, habitualmente considera-se o minuto como a unidade de tempo, assim, esta velocidade é expressa em rotações por minuto (RPM). Para fazer a transição de velocidade de corte para velocidade de rotação, utiliza-se a fórmula (1), representada mais adiante no presente relatório. A velocidade de avanço é o deslocamento longitudinal ou transversal, conforme a operação que se está a efetuar, observado durante cada rotação da árvore do torno, geralmente é expressa em milímetros por rotação (mm/rot). O penetramento ou profundidade de passagem é a espessura da camada que a ferramenta arranca em cada passagem (mm).

A velocidade de corte para desbaste e acabamento, rotação, avanço e penetramento para ferramentas de corte em aço rápido (ao Co), ferramentas utilizadas no estágio, são calculadas através das tabelas representadas nas figuras 8, 9 e 10.

### VELOCIDADES DE CORTE (m/minuto)

Tipo de ferramenta: **Aço rápido (ao Co)**

| Material a trabalhar                      | Classes de trabalho |          |         |          |                        |
|---|---------------------|----------|---------|----------|------------------------|
|   | Torneamento         | Fresagem | Limador | Fresagem | Fresado de engrenagens |
| Aço 40/50<br>Kg/mm <sup>2</sup>           | (d) - 28            | 20       | 18      | 16       | 18                     |
|   | (a) - 40            | 30       |         |          | 26                     |
| Aço 50/70<br>Kg/mm <sup>2</sup>           | 22                  | 18       | 16      | 12       | 16                     |
|   | 30                  | 24       |         |          | 22                     |
| Ligas<br>aluminio<br>Latão duro           | 90                  | 70       | 60      |          |                        |
|   | 120                 | 98       |         |          |                        |
| Ferro<br>fundido 18<br>Kg/mm <sup>2</sup> | 20                  | 16       | 15      | 12       | 14                     |
|   | 24                  | 22       |         |          | 20                     |

(d) - desbaste

(a) - alisado

Figura 8 - Velocidades de corte para desbaste e acabamento para ferramentas em aço rápido (ao Co) para diferentes materiais a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a).

### Velocidade de Corte no Torno

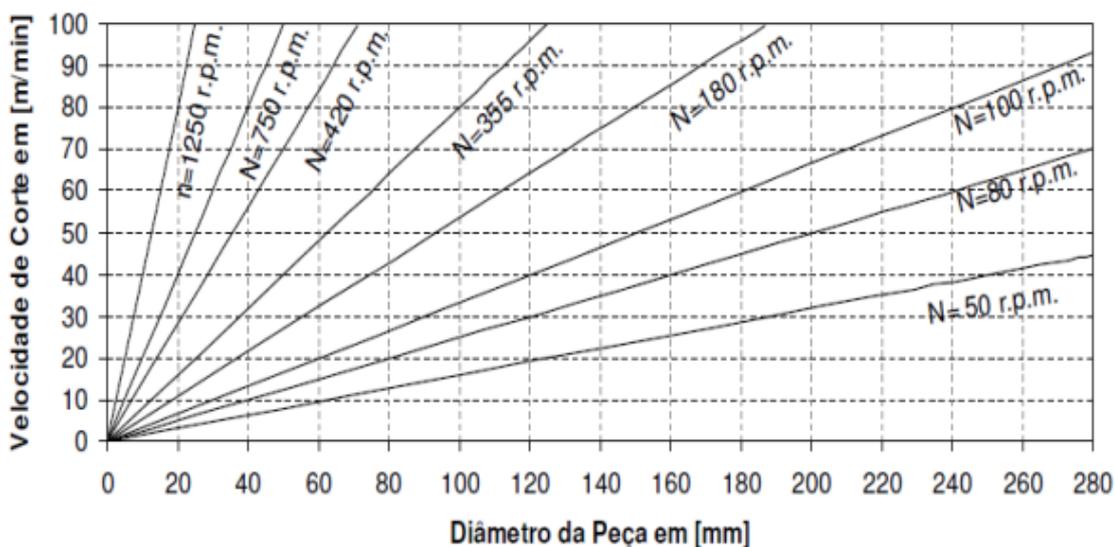


Figura 9 - Velocidade de rotação no torno para material Ck45 em função da velocidade de corte e do diâmetro da peça a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a).

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO - N (rpm)  
 $N = (1000 \cdot V) / (\pi \cdot d)$

|           |     |        |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|-----------|-----|--------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| V (m/min) | 120 | 3822   | 2548 | 1911 | 1529 | 1274 | 1092 | 955 | 849 | 764 | 695 | 637 | 588 | 546 | 510 | 478 | 450 | 425 | 402 | 382 | 306 | 255 | 218 | 191 | 153 | 127 |  |
|           | 110 | 3503   | 2335 | 1752 | 1401 | 1168 | 1001 | 876 | 778 | 701 | 637 | 584 | 539 | 500 | 467 | 438 | 412 | 389 | 369 | 350 | 280 | 234 | 200 | 175 | 140 | 117 |  |
|           | 100 | 3185   | 2123 | 1592 | 1274 | 1062 | 910  | 796 | 708 | 637 | 579 | 531 | 490 | 455 | 425 | 398 | 375 | 354 | 335 | 318 | 255 | 212 | 182 | 159 | 127 | 106 |  |
|           | 95  | 3025   | 2017 | 1513 | 1210 | 1008 | 864  | 756 | 672 | 605 | 550 | 504 | 465 | 432 | 403 | 378 | 356 | 336 | 318 | 303 | 242 | 202 | 173 | 151 | 121 | 101 |  |
|           | 90  | 2866   | 1911 | 1433 | 1146 | 955  | 819  | 717 | 637 | 573 | 521 | 478 | 441 | 409 | 382 | 358 | 337 | 318 | 302 | 287 | 229 | 191 | 164 | 143 | 115 | 96  |  |
|           | 85  | 2707   | 1805 | 1354 | 1083 | 902  | 773  | 677 | 602 | 541 | 492 | 451 | 416 | 387 | 361 | 338 | 318 | 301 | 285 | 271 | 217 | 180 | 155 | 135 | 108 | 90  |  |
|           | 80  | 2548   | 1699 | 1274 | 1019 | 849  | 728  | 637 | 566 | 510 | 463 | 425 | 392 | 364 | 340 | 318 | 300 | 283 | 268 | 255 | 204 | 170 | 146 | 127 | 102 | 85  |  |
|           | 75  | 2389   | 1592 | 1194 | 955  | 796  | 682  | 597 | 531 | 478 | 434 | 398 | 367 | 341 | 318 | 299 | 281 | 265 | 251 | 239 | 191 | 159 | 136 | 119 | 96  | 80  |  |
|           | 70  | 2229   | 1486 | 1115 | 892  | 743  | 637  | 557 | 495 | 446 | 405 | 372 | 343 | 318 | 297 | 279 | 262 | 248 | 235 | 223 | 178 | 149 | 127 | 111 | 89  | 74  |  |
|           | 65  | 2070   | 1380 | 1035 | 828  | 690  | 591  | 518 | 460 | 414 | 376 | 345 | 318 | 296 | 276 | 259 | 244 | 230 | 218 | 207 | 166 | 138 | 118 | 104 | 83  | 69  |  |
|           | 60  | 1911   | 1274 | 955  | 764  | 637  | 546  | 478 | 425 | 382 | 347 | 318 | 294 | 273 | 255 | 239 | 225 | 212 | 201 | 191 | 153 | 127 | 109 | 96  | 76  | 64  |  |
|           | 55  | 1752   | 1168 | 876  | 701  | 584  | 500  | 438 | 389 | 350 | 318 | 292 | 269 | 250 | 234 | 219 | 206 | 195 | 184 | 175 | 140 | 117 | 100 | 88  | 70  | 58  |  |
|           | 50  | 1592   | 1062 | 796  | 637  | 531  | 455  | 398 | 354 | 318 | 290 | 265 | 245 | 227 | 212 | 199 | 187 | 177 | 168 | 159 | 127 | 106 | 91  | 80  | 64  | 53  |  |
|           | 45  | 1433   | 955  | 717  | 573  | 478  | 409  | 358 | 318 | 287 | 261 | 239 | 220 | 205 | 191 | 179 | 169 | 159 | 151 | 143 | 115 | 96  | 82  | 72  | 57  | 48  |  |
|           | 40  | 1274   | 849  | 637  | 510  | 425  | 364  | 318 | 283 | 255 | 232 | 212 | 196 | 182 | 170 | 159 | 150 | 142 | 134 | 127 | 102 | 85  | 73  | 64  | 51  | 42  |  |
|           | 35  | 1115   | 743  | 557  | 446  | 372  | 318  | 279 | 248 | 223 | 203 | 186 | 171 | 159 | 149 | 139 | 131 | 124 | 117 | 111 | 89  | 74  | 64  | 56  | 45  | 37  |  |
| 30        | 955 | 637    | 478  | 382  | 318  | 273  | 239  | 212 | 191 | 174 | 159 | 147 | 136 | 127 | 119 | 112 | 106 | 101 | 96  | 76  | 64  | 55  | 48  | 38  | 32  |     |  |
| 25        | 796 | 531    | 398  | 318  | 265  | 227  | 199  | 177 | 159 | 145 | 133 | 122 | 114 | 106 | 100 | 94  | 88  | 84  | 80  | 64  | 53  | 45  | 40  | 32  | 27  |     |  |
| 20        | 637 | 425    | 318  | 255  | 212  | 182  | 159  | 142 | 127 | 116 | 106 | 98  | 91  | 85  | 80  | 75  | 71  | 67  | 64  | 51  | 42  | 36  | 32  | 25  | 21  |     |  |
| 15        | 478 | 318    | 239  | 191  | 159  | 136  | 119  | 106 | 96  | 87  | 80  | 73  | 68  | 64  | 60  | 56  | 53  | 50  | 48  | 38  | 32  | 27  | 24  | 19  | 16  |     |  |
| 10        | 318 | 212    | 159  | 127  | 106  | 91   | 80   | 71  | 64  | 58  | 53  | 49  | 45  | 42  | 40  | 37  | 35  | 34  | 32  | 25  | 21  | 18  | 16  | 13  | 11  |     |  |
|           |     | 10     | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 65  | 70  | 75  | 80  | 85  | 90  | 95  | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 |  |
|           |     | D (mm) |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |

**Torneamento:**  
 V - velocidade de corte em m/minuto  
 D - diâmetro da peça a toronar (mm)  
 N - Nº de rotações (rpm) da árvore do torno

**Fresagem:**  
 V - velocidade de corte em m/minuto  
 D - diâmetro da fresa (mm)  
 N - Nº de rotações (rpm) da fresa

Figura 10 - Velocidade de rotação no torno para material Ck45 em função da velocidade de corte e do diâmetro da peça a trabalhar. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018a).

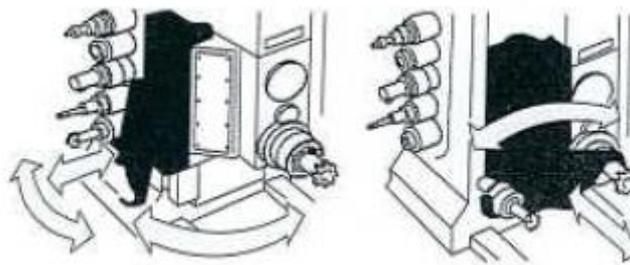
### 3.2 – Fresamento (Nos Centros de Maquinagem)

Outro processo de fabrico muito utilizado no decorrer do estágio foi o fresamento, recorrendo a centros de maquinagem (CM) de 3 eixos. Pode-se definir um CM como uma fresadora CNC (Comando Numérico Computadorizado), quer seja do tipo vertical ou horizontal ou fresadora-mandriladora e que está equipada com um armazém de ferramentas, que, para a mesma peça e com apenas um aperto, permite que sejam executados uma série de operações em sequência (fresamento, furação, roscagem, entre outras), utilizando diversas ferramentas e parâmetros de corte (Relvas, 2002).

Os CMs podem ser divididos em dois grupos: horizontais, com maior campo de aplicação, apropriados para a maquinagem de peças que sejam inscritas em volumes paralelepípedicos ou cúbicos, e verticais, de custo mais reduzido, menor versatilidade e adequados à maquinagem em apenas uma face de planos.

Os CMs de menores dimensões, possuem na mesa, movimentos cruzados em X e Y, já os de maiores dimensões é a coluna que se desloca. Geralmente, os centros de maquinagem encontram-se equipados com sistemas automáticos de alimentação de ferramentas, permitindo assim reduzir tempos improdutivo. Os armazéns de ferramentas do tipo tambor, matriz ou cadeia possibilitam a execução de sequências operatórias recorrendo a um elevado número de ferramentas.

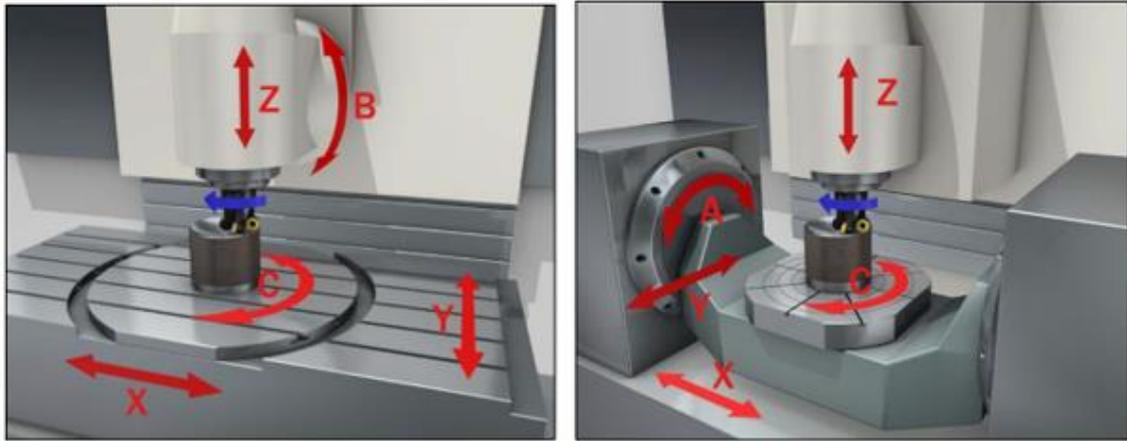
A Figura 11 representa a substituição automática das ferramentas.



**Figura 11 - Substituição automática das ferramentas num centro de maquinagem. Imagem adaptada de (Completo et al, 2009).**

Os CMs utilizam um sistema de coordenadas cartesianas para controlar numericamente os três eixos principais (X, Y, Z).

Nas Figuras 12 e 13 pode-se observar, respetivamente dois CMs de 5 eixos e um CM de 3 eixos, sendo este último representativo daquele utilizado no estágio.



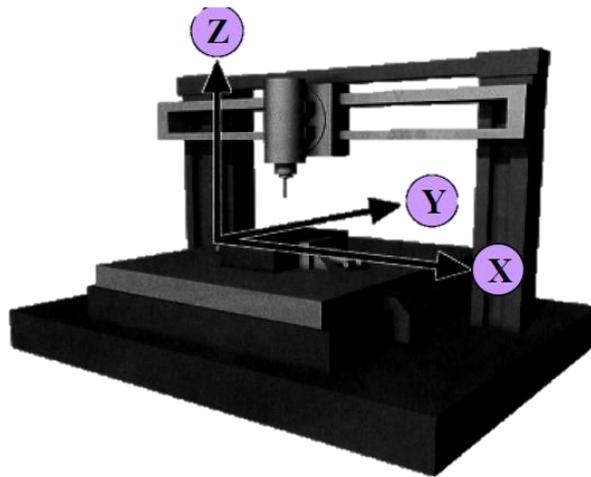
Centro de maquinagem com 5 eixos

3 eixos Translação: X; Y; Z + 2 eixos Rotação: B; C

Centro de maquinagem com 5 eixos

3 eixos Translação: X; Y; Z + 2 eixos Rotação: A; C

**Figura 12 - Centros de maquinagem de 5 eixos. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).**



**Figura 13 - Centro de maquinação de 3 eixos. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).**

Relativamente aos movimentos característicos que um CM realiza durante operações de fresamento temos:

- **Movimento Principal ou de Corte** - a fresa, animada de movimento circular uniforme a uma dada velocidade de rotação executa este movimento;
- **Movimento de Penetração** – executado pela fresa que se encontra emparelhada à árvore principal e com uma determinada profundidade no material;
- **Movimento de Avanço** – normalmente, é executado pela peça (excetuando em máquinas de mesa fixa) que se movimenta segundo um sistema de 2 ou mais eixos e define a velocidade do deslocamento linear relativo entre a peça e a fresa e é expresso, normalmente, em milímetros por minuto.

São inúmeras as operações possíveis de se realizar num CM, sendo praticamente impossível enumerar todas.

Algumas operações possíveis de se realizar num CM são:

- Furação;
- Mandrilagem;
- Roscagem;
- Fresamento.

O fresamento é um dos métodos de maquinagem por arranque de apara com maior versatilidade, bem como um dos mais complexos, devido ao seu índice de remoção de material extremamente elevado, o que permite excelentes acabamentos de superfície. Comparativamente com o torneamento, existem diversos fatores que podem influenciar o resultado da maquinagem.

Através deste método atrás mencionado é possível efetuar facejamentos, aberturas de caixas de fundo plano, de molduras ou de aros e ranhurar.

Tal como na maior parte das operações de maquinagem onde exista um grande volume de material a ser removido, deve ser estabelecida uma fase de desbaste e outra de acabamento da superfície fresada. No entanto, em peças em que haja um grande volume de material a ser removido pode ser considerada uma fase de pré-desbaste e nas peças com geometrias complexas, ou cujo acabamento superficial necessite ter uma qualidade muito boa, existe a necessidade de se executar uma ou várias operações de semi-acabamento entre o desbaste e o acabamento final.

Existem, fundamentalmente, dois processos de fresamento para obtenção de superfícies (Figura 14):

- a) **Fresamento Cilíndrico** – o eixo de rotação da ferramenta trabalha paralelamente à superfície a maquinar, sendo o corte, realizado na periferia da superfície lateral de corte da ferramenta. Este processo pode originar pequenas ondulações na superfície maquinada.

- b) **Fresamento Frontal** – o eixo de rotação da ferramenta trabalha perpendicularmente à superfície a maquinar, o corte realiza-se quer nas partes laterais da ferramenta quer no topo da mesma. Este processo origina, posteriormente à maquinagem, o surgimento de uma superfície raiada.

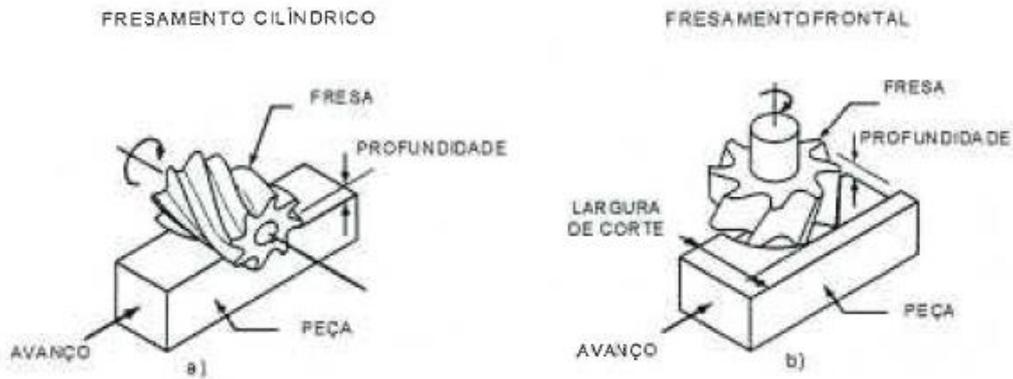


Figura 14 - Representação de dois processos de fresamento para obtenção de superfícies. Imagem adaptada de (Completo *et al*, 2009).

Os movimentos de fresamento caracterizam-se pelo movimento da fresa em relação à peça, distinguindo-se dois tipos distintos, concordante e discordante (Figura. 15).

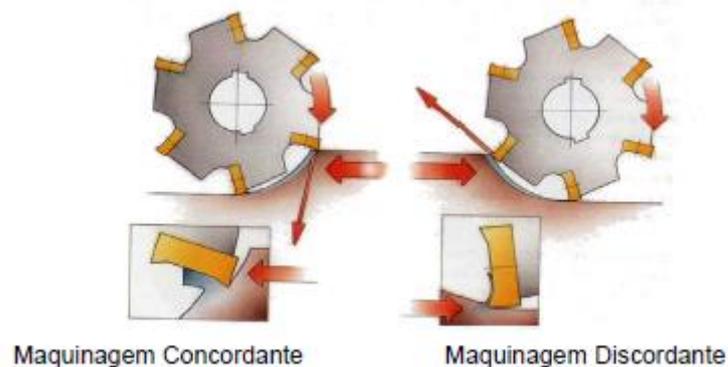


Figura 15 - Movimentos de fresamento. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).

|                                | Corte concordante  | Corte discordante   |
|--------------------------------|--|---|
| <b>Forças de corte</b>         | Estão direcionadas no sentido da peça  | Estão direcionadas no sentido oposto à peça.  |
| <b>Espessura da limalha</b>    | Diminui  | Aumenta   |
| <b>Calor</b>                   | Eficiência na dissipação do calor para a limalha.  | É transferido para a peça aumentando o desgaste da ferramenta.  |
| <b>Desgaste da Ferramenta</b>  | É baixo  | Extremamente elevado, pois ao longo do corte há um aumento da espessura da limalha, e conseqüente aumento de tensões de corte aquando da libertação da limalha.   |
| <b>Vida útil da ferramenta</b> | Quadruplica. Deve-se à eficiente remoção da limalha, prevenindo o seu contacto com as arestas de corte da ferramenta e conseqüente quebra. | Reduz. A limalha é projetada no sentido de corte da ferramenta, sendo pressionada entre a ferramenta e a peça. Remaquinando-a, provoca a quebra da zona de corte e exerce forças de flexão na ferramenta. |

Figura 16 - Características do corte concordante e discordante. Imagem adaptada de (Simões e Ferreira, 2018b).

Os parâmetros de corte para a operação de fresamento são, velocidade de rotação, velocidade de avanço, profundidade de corte e largura de corte (Figura 17).

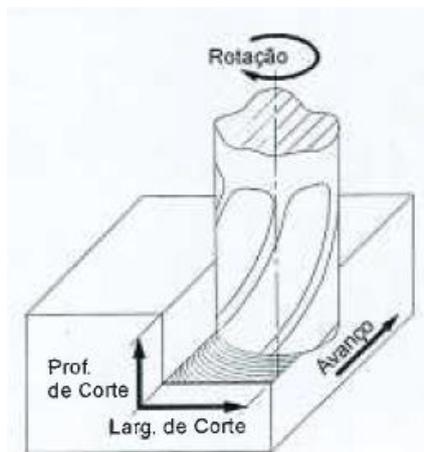


Figura 17 - Movimentos na operação de fresamento. Imagem adaptada de (Relvas, 2002).

**Velocidade de Rotação:** velocidade angular da fresa (em RPM). O valor desta constante depende da velocidade de corte parametrizada para uma dada operação. Esta velocidade corresponde à velocidade linear de um ponto na periferia da fresa e define a velocidade a que se pode cortar o material;

$$n = \frac{V_c \times 100}{\pi \times D} \quad (1)$$

n – Velocidade de rotação (rpm);  $V_c$  – Velocidade de corte (m/min); D – Diâmetro de fresa (mm)

**Velocidade de Avanço:** velocidade a que a fresa se desloca sobre a peça a maquinar e estabelece a espessura da aparta, o seu valor é expresso em milímetros por rotação ou em milímetros por minuto. Juntamente com a velocidade de rotação são os dois fatores que maior influência tem na vida útil da ferramenta.

$$f = f_z \times z \times n; f_n = f_z \times z \quad (2)$$

f – Vel. de avanço da mesa (mm/min);  $f_n$  – Vel. De avanço por rotação (mm/rot);  $f_z$  – avanço por navalha (mm); n – Vel. De rotação da fresa; z – Número de navalhas da fresa.

**Profundidade de Corte:** dimensão ou altura que a fresa penetra no material da peça. O seu valor exprime-se em milímetros e possibilita determinar a altura da aparta que, juntamente com a espessura da mesma, institui o valor da secção desta. O valor da profundidade de corte é importante para calcular a potência necessária para efetuar o corte.

**Largura de Corte:** dimensão ou largura de atuação da fresa durante o corte, expressa-se em milímetros e calcula-se relativamente ao diâmetro da fresa, em valore que, normalmente, variam entre os 50% e os 90% do diâmetro da mesma.

## CAPÍTULO 4 – PROJETOS DESENVOLVIDOS

### 4.1 - Flange de Ligação Entre um Motor e uma Bomba Hidráulica

Existiu a necessidade de se criar uma flange de ligação entre um motor *Nord®* IE5 B35 e uma bomba hidráulica *Scherzinger®* 551 FB-DU-MK-L63. Esta necessidade surgiu porque os equipamentos não eram compatíveis entre si a nível de acoplamento um ao outro.

A primeira etapa passou por analisar as geometrias dos dois componentes e perceber como seria feita a ligação entre elas, tirar medições e desenvolver um protótipo através do *Solidworks* (Figura 18) para perceber a exequibilidade do projeto.

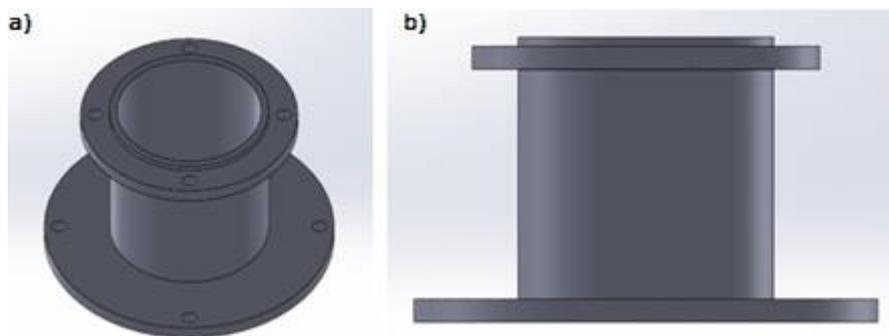


Figura 18 - Protótipo da flange a desenvolver.

Logo após se perceber que era possível realizar uma flange de ligação entre os dois componentes, transferiu-se as fichas técnicas (*datasheets*) de ambos e os modelos CAD (*Computer Aided Design*) para confirmar as medidas obtidas e ter acesso às tolerâncias geométricas das peças para, assim, dimensionar a flange de uma maneira mais precisa e ajustada. Um ajustamento mecânico traduz-se na conexão de um veio com um furo de peça, no qual se origina o contato dos seus elementos conjugados (Morais, 2012). Através dessas medidas projetou-se a flange de ligação, a qual seguiu posteriormente para maquinação num torno mecânico. Este projeto consistiu em simplificar a geometria obtida no protótipo de maneira a tornar a sua maquinação mais fácil, rápida e barata, bem como desperdiçar a menor quantidade de material possível.

Para a realização desta peça, utilizou-se um bloco redondo de alumínio AW 2017A com 210mm de diâmetro, para se poder efetuar também, um ciclo de acabamento superficial.

Antes de se maquinar a peça no torno mecânico, furou-se o bloco para que neste pudesse ser inserida uma fita de serra e, num serrote vertical, retirar material do seu interior e obter uma geometria circular (Figura 19), o que permitiu aproveitamento de matéria-prima (Figura 20).



**Figura 19 - Abertura de furo para remoção de material interior através de serrote de fita.**



**Figura 20 – a) Geometria a maquinar; b) matéria-prima a aproveitar.**

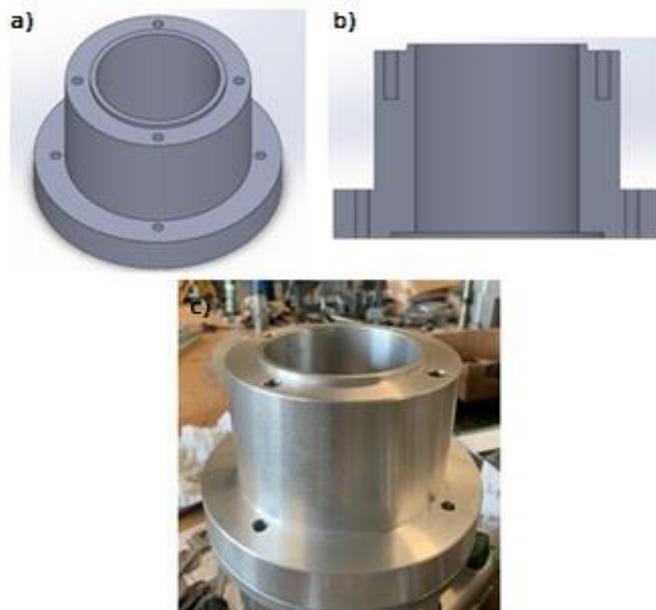
No torno mecânico, o bloco de alumínio foi apertado através de um sistema de fixação, o qual é, neste caso, uma bucha com quatro garras autocentrantes conforme se pode observar na Figura 21 e maquinado com buris de aço rápido (ao Co).



**Figura 21 - Aperto da geometria a maquinar num torno convencional.**

Calcularam-se as velocidades de corte para desbaste e acabamento, rotação, avanço e penetramento para o alumínio através das tabelas apresentadas no capítulo anterior e obteve-se a geometria final representada na Figura 22.

De maneira a centrar os componentes criaram-se dois entalhes na flange, um positivo (veio, elemento exterior) e um negativo (furo, elemento interior), com as dimensões representadas na Figura 23, traduzindo-se as cotas de diâmetro interno e externo em ajustamentos H7 e h6 respetivamente que, quando acoplados ao motor e à bomba hidráulica e conjugados com as tolerâncias destes, tratam-se de ajustamentos de classe deslizante justo, montagem manual sob pressão e mecânica cuidada, sendo este tipo de ajustamento ideal para aplicações de acoplamentos (Morais, 2012).



**Figura 22 - Geometria final da flange desenvolvida.**

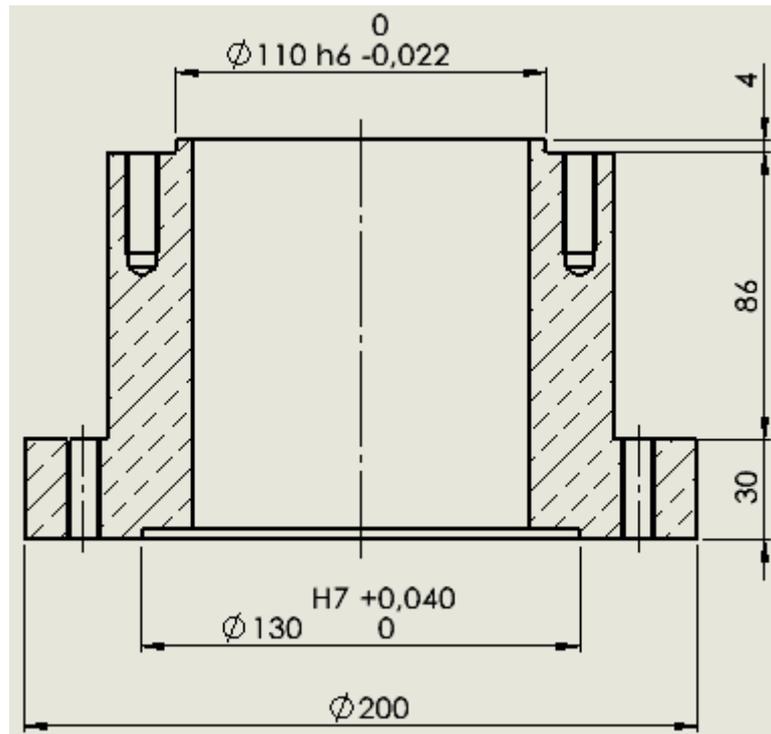


Figura 23 - Dimensões da flange desenvolvida.

Na Figura 24 encontra-se representada a montagem do conjunto. Como se pode observar nesta figura, a conexão entre os componentes faz-se através de ligações aparafusadas de classe métrica 8.8, uma vez que, efetuou-se roscagem em todos os furos com recurso a machos M10, numa das faces utilizou-se uma furação passante, onde os parafusos fixam o motor à flange e na outra utilizou-se uma furação cega que fixa a bomba hidráulica à mesma.



Figura 24 - Montagem dos componentes:  
Motor; Flange; Bomba Hidráulica.

## 4.2 – Dispositivo Elevatório de Tapa de Reservatório Cilíndrico e Bomba Hidráulica

Foi pedido que se arranjasse uma solução para uma linha de produção de uma empresa. O problema identificado e que se pretendia extinguir ou, pelo menos, atenuar, consistia no tempo despendido na substituição de forma manual de um reservatório cilíndrico vazio por um cheio e desacoplamento e acoplamento de uma bomba hidráulica ARO® LM 2203A-11-C na tampa dos mesmos, processo que se mostrava ser muito exagerado em termos de tempo improdutivo. De referir que, a mesma tampa era utilizada em todos os recipientes pois, esta, já tinha sido modificada de maneira que a bomba pudesse entrar por um furo de diâmetro ligeiramente superior ao do seu pescoço, conforme se pode verificar na Figura 25, e assim alcançar o interior do reservatório. De forma a melhor explicar a situação esquematizou-se o problema na Figura 26.



Figura 25 - Modificação efetuada na tampa do reservatório.

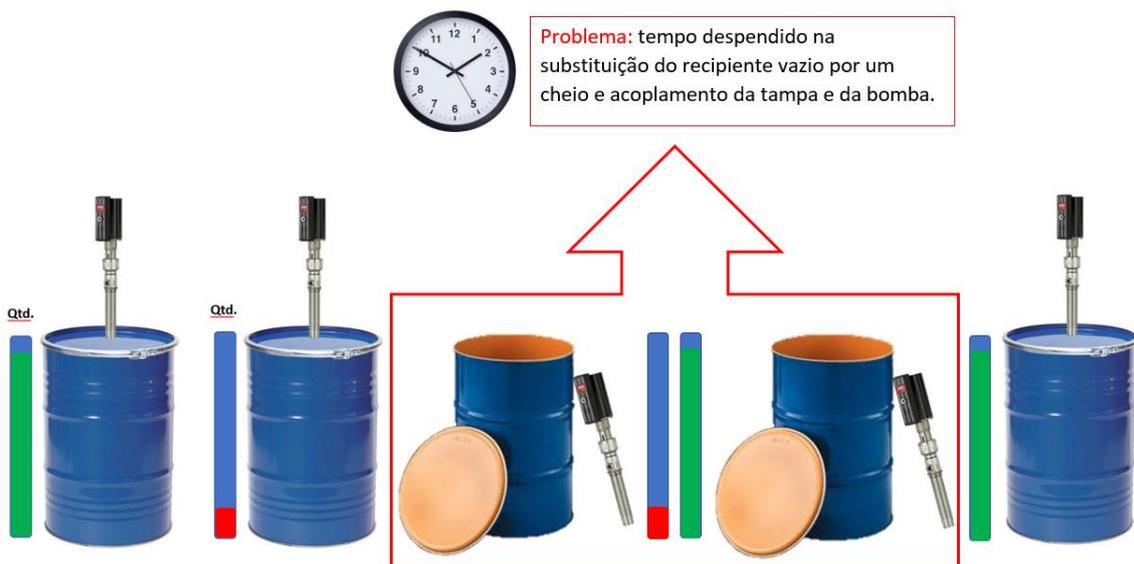


Figura 26 - Esquematização do problema.

Ao analisar todo esse processo de retirar a tampa e a bomba, substituir o recipiente vazio por um cheio e voltar a acoplar os dois componentes, percebeu-se que a melhor solução, do ponto de vista prático e com o intuito de se reduzir o tempo que este processo envolvia era, a bomba e a tampa estarem acopladas entre si por meio de uma ligação roscada e desenvolver um dispositivo que fizesse a elevação do conjunto até uma cota que permitisse a extração do recipiente vazio e substituição deste por um cheio e que, posteriormente, descesse o conjunto até a cota da altura do recipiente (Figura 27) para que, a tampa seja acoplada posteriormente ao recipiente através de uma abraçadeira (Figura 28). Desta forma o operador apenas teria de empregar tempo na substituição dos recipientes e no fecho do manobrador.



**Figura 27 - Esquema da elevação da tampa e bomba hidráulica acopladas para substituição do reservatório.**



**Abraçadeira**

**Figura 28 – Abraçadeira.**

Definida a solução, era tempo de delinear como seria o modo de elevação do conjunto, tampa e bomba hidráulica. Como o conjunto apresentava uma massa relativamente baixa (<20Kg), não levou muito até se concluir que a melhor solução e a mais indicada para o caso em questão seria, recorrendo a um cilindro pneumático que elevasse o conjunto e o descesse através da atuação da haste do mesmo.

Prosseguiu-se à etapa de obter as dimensões do recipiente recorrendo a instrumentos de medição, tais como, o paquímetro e a fita métrica. Quanto às dimensões da bomba hidráulica, recorreu-se ao *datasheet* da mesma para se obter toda a informação necessária de forma mais detalhada e precisa.

Com as medições obtidas verificou-se que, a bomba teria de atingir uma cota superior a 85 cm desde a base do recipiente para que todo o seu pescoço saísse do interior do mesmo, tornando assim possível a substituição dos recipientes. No entanto surgiu outra questão que foi, como transferir o movimento da haste do cilindro para a bomba. De forma a poder solucionar esta questão decidiu-se que o curso do cilindro teria 100 cm, para assim ter espaço de manobra para desenvolver algum meio de ligação entre este e a bomba.

Uma vez que o curso do cilindro é relativamente comprido e seria utilizado na vertical, foi necessário reforçar a sua estrutura para prevenir empenos e proteger contra possíveis colisões. Para tal utilizaram-se dois perfis quadrados em aço St 37-2, um que se movimenta no interior do outro conforme os representados na Figura 29, sendo o perfil de maiores dimensões de 120x120mm e 1270mm de comprimento e o mais pequeno 100x100mm e 1330mm de comprimento respetivamente e ambos com 5mm de espessura, nas paredes destes perfis aplicaram-se umas geometrias retangulares de um material polimérico, Nylon PA6, que serve de chumaceira de deslizamento, para que não haja contato metal-metal e assim prevenir o desgaste dos perfis.

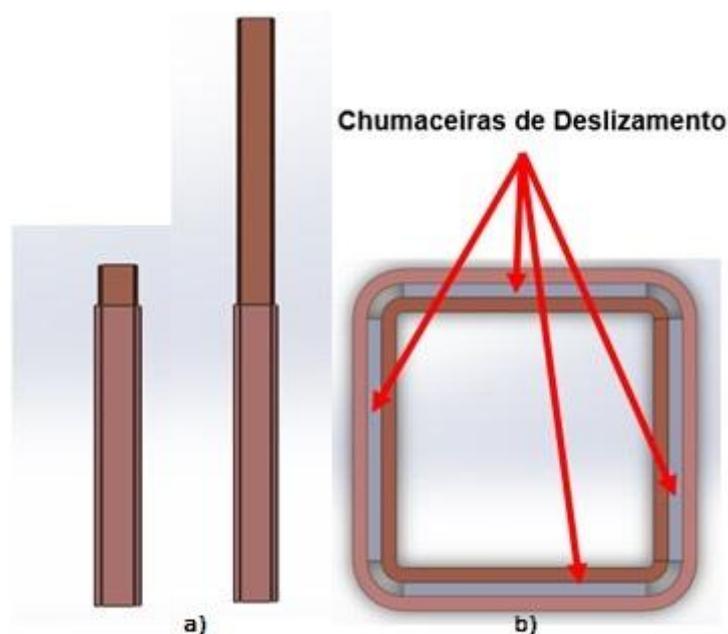


Figura 29 – a) Perfis quadrados; b) Placas de Nylon.

O perfil de 100x100mm é ligeiramente mais comprido do que o de 120x120mm para que, posteriormente, pudesse ser aberta uma janela de acesso ao seu interior e ao cilindro para efetuar o acoplamento da haste do cilindro à tampa que será mencionada de seguida.

De maneira a fixar o cilindro no interior dos perfis e tornar todo o conjunto funcional, criou-se uma base para assentar o cilindro na extremidade inferior do perfil exterior, a qual foi furada de maneira a fixá-lo através de ligações aparafusadas recorrendo a parafusos DIN 912 M6 de classe métrica 8.8, conforme representado na Figura 30 e, uma tampa (Figura 31) para a extremidade do perfil interior para que a haste do cilindro possa empurrar e fazer o perfil deslizar para cima ao longo de todo o seu curso. Esta base e tampa foram ambas fixas aos perfis através de cordões de soldadura efetuados pelo processo MIG/MAG.

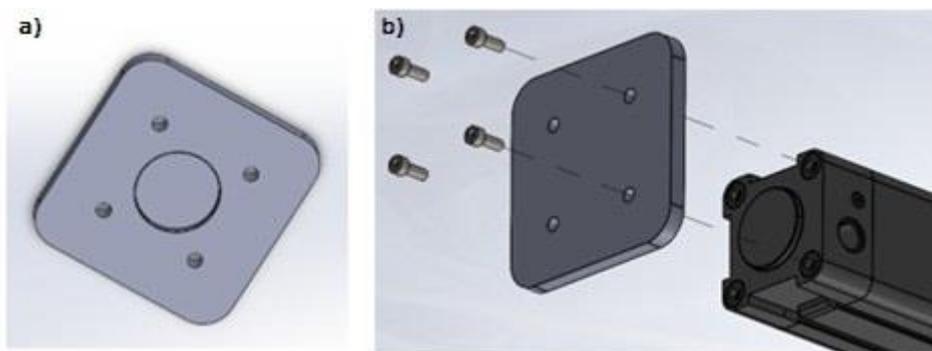


Figura 30 – a) Base de assento do cilindro; b) Fixação através de parafusos DIN 912 M6.

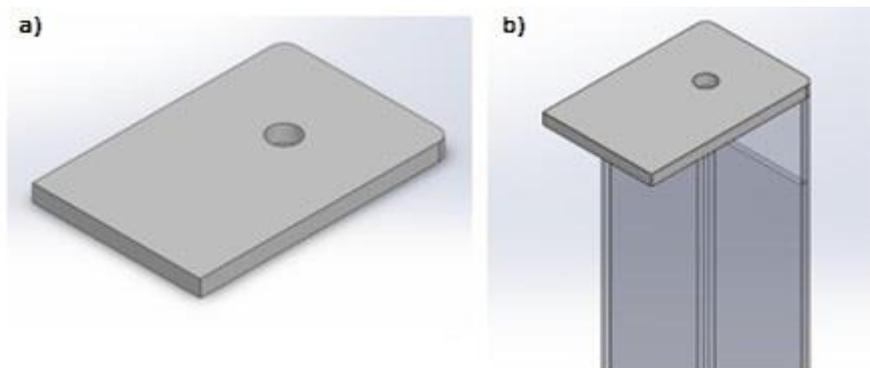
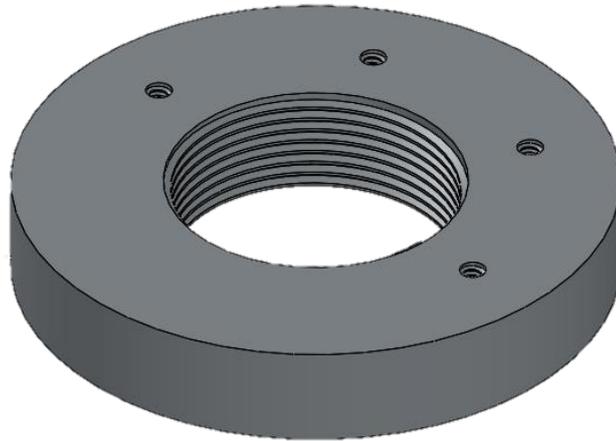


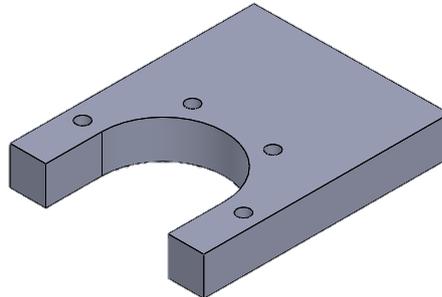
Figura 31 - Tampa da extremidade do perfil interior.

O componente de ligação entre a bomba hidráulica e a tampa do reservatório encontra-se representado na Figura 32 e é roscado centralmente com rosca M50 para que a bomba hidráulica possa ser acoplada ao mesmo. Este componente é fixo na tampa do recipiente através de um cordão de soldadura recorrendo ao processo atrás mencionado. Além disso, existem também outros quatro furos roscados a M5 que tem a finalidade de fixar este componente a outro, a abordar de seguida, que se encontra conectado ao perfil quadrado de menores dimensões e que, quando a haste do cilindro é atuada, este componente acompanha o movimento e assim eleva ou desce a tampa e a bomba hidráulica.



**Figura 32 - Componente de ligação entre a bomba hidráulica e a tampa do reservatório.**

O componente anteriormente mencionado, é fixo, através de parafusos DIN 912 M5 de classe métrica 8.8, ao componente representado na Figura 33. A este componente e à tampa do perfil de menores dimensões, é soldado um perfil UPN 100 de 480mm, que foi posteriormente modificado (Figura 34) e, assim, estando todos estes componentes ligados entre si, torna todo o conjunto elevatório funcional.

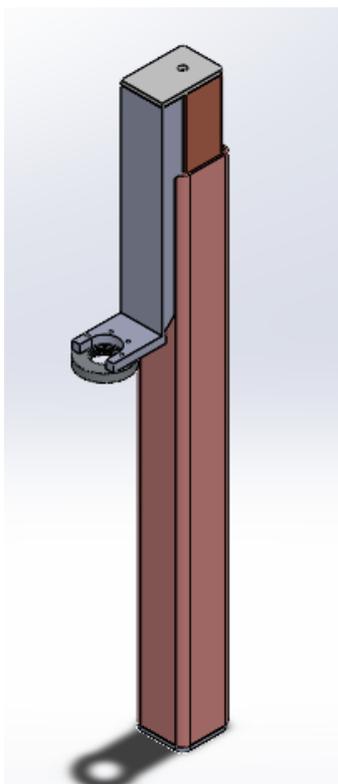


**Figura 33 - Componente de ligação entre perfil UPN 100 e componente de ligação entre a bomba hidráulica e a tampa do reservatório.**



**Figura 34 - Perfil UPN 100 e respetivas modificações efetuadas.**

Em suma, todo o conjunto elevatório funcional, caracteriza-se pelos componentes anteriormente referidos e pode ser representado conforme a Figura 35.



**Figura 35 - Conjunto elevatório.**

No entanto, apesar de funcional, o conjunto não era estável por si só, então surgiu a necessidade de se criar uma base que suportasse o mesmo e em simultâneo o recipiente. Para tal, recorreu-se novamente ao perfil UPN 100 para elaboração da mesma, uma vez que se trata de um perfil versátil e existir em abundância no armazém da empresa. A base é constituída por 6 pedaços deste perfil, sendo que, 2 deles têm 1300mm e os outros 4 têm 415mm. Como se pode observar, a Figura 36 representa a base, tendo-se efetuado a ligação entre os perfis através da tecnologia de soldadura MIG/MAG, uma vez mais. Num dos perfis efetuaram-se quatro furos com as mesmas cotas daqueles realizados na base do conjunto elevatório, onde o cilindro se encontra assente, para que se possa fixar o conjunto à base através das ligações aparafusadas atrás mencionadas. A montagem da base com o conjunto elevatório (Figura 37 a)) permitiu perceber que o acoplamento destes componentes através de parafusos, não conferia a estabilidade pretendida pois, quando a haste do cilindro estava totalmente elevada, era um comprimento muito grande e com o peso da bomba hidráulica, dos outros componentes e possíveis colisões com os perfis quadrados poderia surgir um fenómeno de flexão e ter como consequência a rotura dos parafusos. Para evitar que tal acontecesse, soldaram-se dois perfis quadrados de 50x50mm ao conjunto elevatório e à base, conforme representado na Figura 37 b) e, assim, conferir mais rigidez ao conjunto.

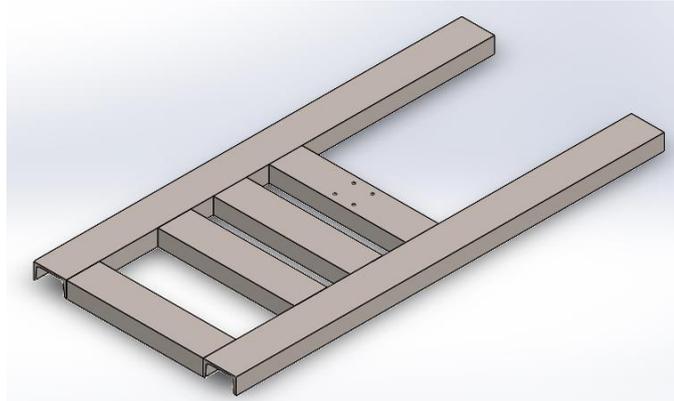


Figura 36 - Base de assento do conjunto elevatório.

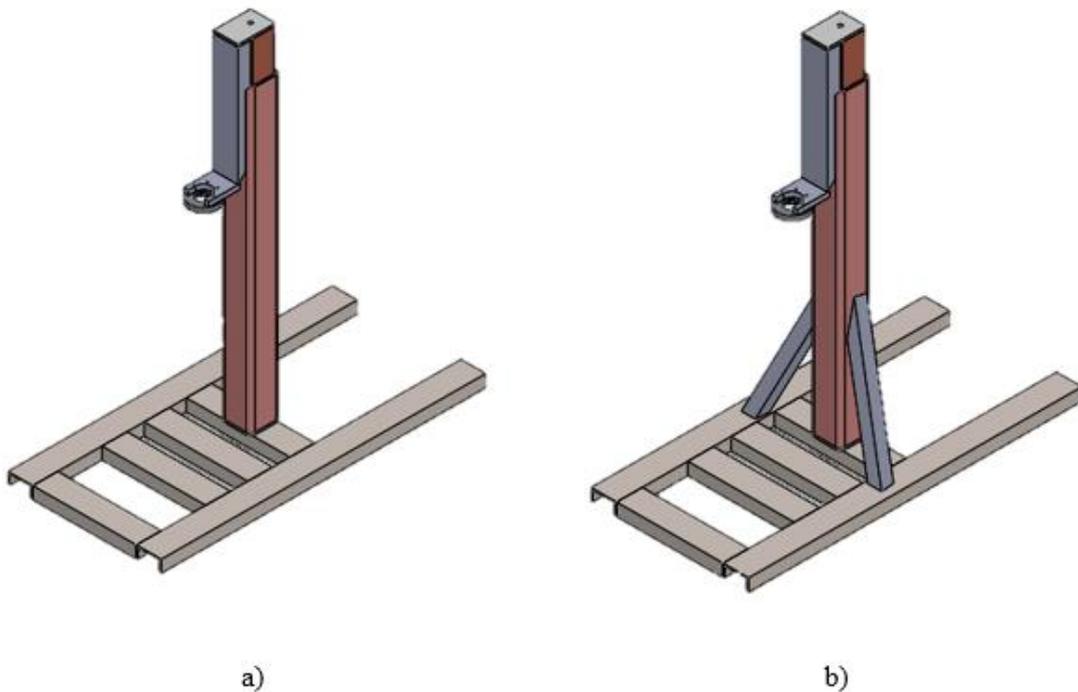
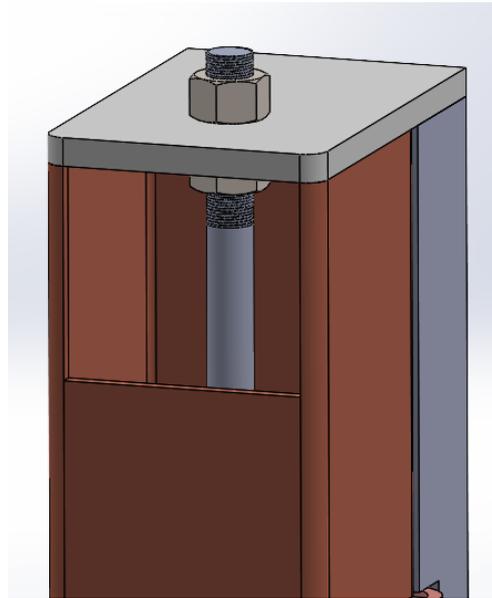
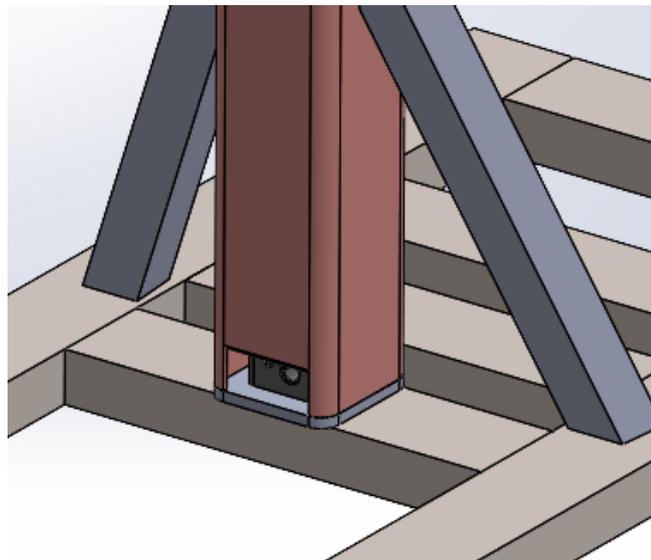


Figura 37 - a) Assemblagem entre conjunto elevatório e base; b) Solda de dois perfis quadrados 50x50mm à base e ao conjunto elevatório para conferir rigidez.

Tanto no perfil quadrado interior como, no exterior, existem janelas de acesso à haste do cilindro e à alimentação/escape de ar comprimido, respetivamente. A janela de acesso do perfil interior permite interagir com a haste do cilindro e assim fazer o acoplamento da mesma à tampa do perfil interior, recorrendo a uma porca e contraporca, ao furo existente na tampa e ao varão roscado presente na extremidade da haste do cilindro (Figura 38), assim quando o cilindro é atuado, este transmite o movimento linear ao sistema elevatório. Já a janela do perfil exterior (Figura 39) permite, fazer a alimentação de ar comprimido que faz com que a haste do cilindro suba e também, efetuar o escape do ar quando é necessário que a mesma recolha, cortando a alimentação de ar comprimido e assim a descida é efetuada por ação da gravidade.

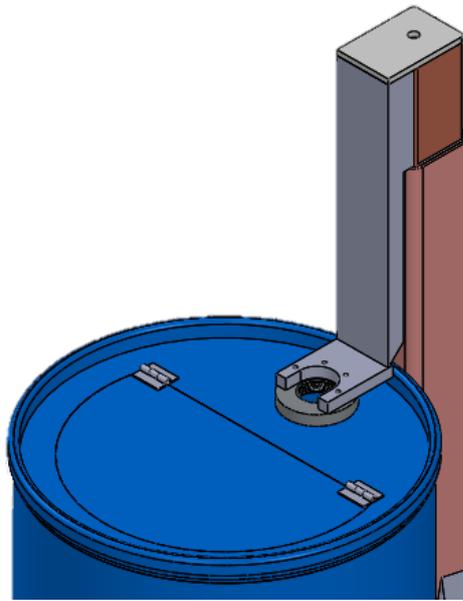


**Figura 38 - Janela de acesso do perfil interior e acoplamento da haste do cilindro à tampa do conjunto elevatório.**



**Figura 39 - Janela do perfil exterior.**

Na tampa do reservatório criou-se uma porta para que o utilizador possa ver a quantidade de fluído ainda presente no mesmo sem necessidade de paragem da operação de bombeamento para elevação da tampa. Esta porta encontra-se fixa à tampa por meio de dobradiças soldadas a ambos os componentes e encontra-se representada na Figura 40.



**Figura 40 - Porta para observação do nível de fluido no interior do reservatório.**

O dispositivo devidamente elaborado, bem como o seu funcionamento, encontra-se ilustrado na Figura 41. De referir que se acrescentou, posteriormente ao seu projeto em *Solidworks*®, um manobrador soldado ao perfil quadrado exterior para que, quando a tampa do recipiente estiver assente no mesmo, possa ser feita uma vedação mais uniforme e estanque, bem como, o acrescento de um conjunto de 4 rodas para permitir o transporte do dispositivo para onde for necessário.



**Figura 41 - Montagem final do dispositivo e funcionamento do mesmo.**

### 4.3 – Garra Manipuladora para Robô

Pretendeu-se, com este projeto, desenvolver uma garra manipuladora com três braços (Figura 42) para que, um robô (já existente), à saída de uma granalhadora, pudesse agarrar e transportar válvulas de várias dimensões (Figura 43) e largá-las no local pretendido para posterior posicionamento numa linha de pintura.

A necessidade de utilização de um robô e um *gripper* (ferramenta manobrada por um robô) que agarrasse as válvulas e as transportasse surgiu para automatizar a linha de produção de válvulas e assim rentabilizar o processo, nomeadamente reduzir o tempo de transporte das válvulas desde a saída da granalhadora até à entrada das mesmas na estufa de pintura pois o rendimento da linha não estava a ser aproveitado ao máximo, uma vez que o processo de transporte das válvulas de um ponto para o outro não acompanhava a taxa de pintura das válvulas (1 válvula a cada 40 segundos). Esta melhoria permite também poupar a saúde dos colaboradores do cliente, pois tinham de pegar em algumas válvulas de dimensões e massas consideráveis e muitas vezes recorrer a guinchos para levantar e transportar as mais pesadas. De maneira a enquadrar o leitor, a válvula de maiores dimensões tem 500mm de altura, diâmetro 455mm e uma massa de aproximadamente 100Kg (Figura 44). O processo de elevação e transporte das válvulas de forma manual não é ergonómico, causando bastante desgaste ao operador, visto ser um processo que se realizava várias vezes ao dia. A elevação e transporte das válvulas é de difícil manuseamento dada a geometria das válvulas e à ausência de pegas. A altura de transporte por parte do utilizador é feita ao nível do tronco, causando flexão e torção do mesmo. Estas características mencionadas causavam sobre esforços e requeriam posturas e movimentos desfavoráveis aos operadores, tendo também em consideração a quantidade de vezes que o operador realizava esta tarefa diariamente. De notar que a movimentação manual de cargas danifica a saúde dos colaboradores levando à deterioração gradual do sistema musculoesquelético (zona lombar).

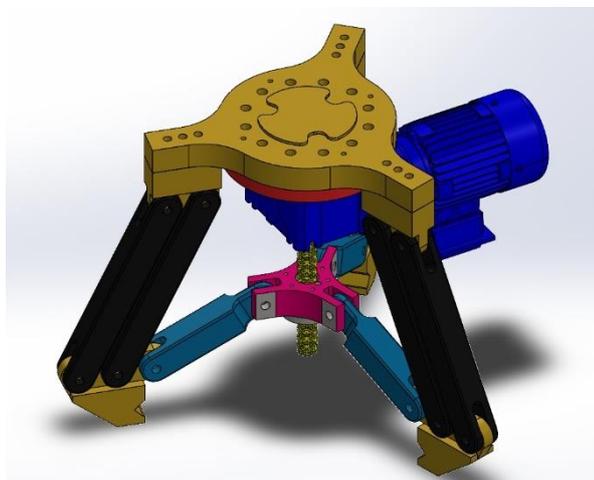


Figura 42 - Garra manipuladora.



Figura 43 – Válvulas.

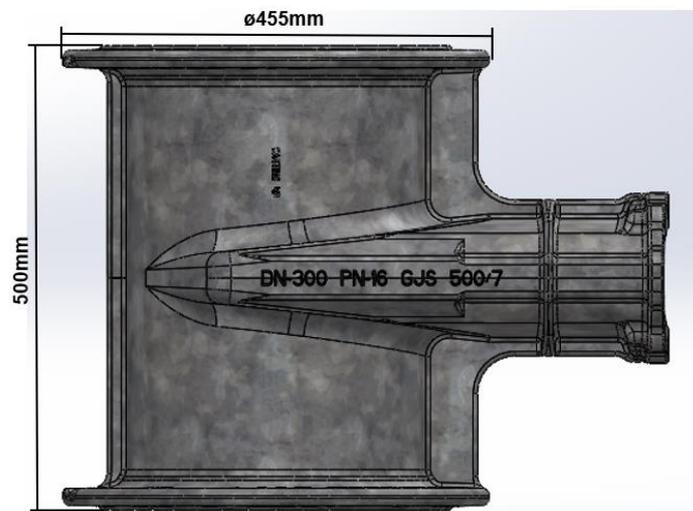


Figura 44 - Válvula de maiores dimensões.

Para que pudesse ser possível realizar um *gripper* capaz de agarrar e movimentar as válvulas, foi necessário importar os modelos CAD das válvulas, bem como do robô, para obtenção de cotas e suas variadas geometrias. Trata-se de um robô da marca *ABB®*, modelo IRB 6700 e, segundo a ficha técnica do fabricante, suporta cargas na ordem dos 230Kg e tem um alcance de 2.65m, encontrando-se representado na Figura 45.



Figura 45 - Robô ABB IRB 6700.

Obtidos os diâmetros e alturas das várias válvulas, assim como, as suas diferentes configurações, deu-se início ao projeto mecânico propriamente dito, recorrendo ao software *Solidworks*®.

O passo inicial deste projeto consistiu em, através da geometria da flange existente no braço do robô, desenhar, outra flange para efetuar a ligação do *gripper* ao mesmo. Para tal, primeiro foi necessário contabilizar o número de furos roscados existentes, a dimensão dos mesmos, a que distância se encontram entre si e do centro da geometria da flange do robô. Depois de analisada a geometria, contabilizaram-se 12 furos roscados M12, equidistantes entre si e situados a 80mm do centro da geometria. Tendo em conta que se pretendia criar um modelo funcional que, ao mesmo tempo, fosse o mais leve possível e quando suportasse a válvula de maiores dimensões não tivesse um centro de massa muito distante da extremidade do braço do robô, existiu a necessidade de se criar geometrias robustas para suportar as válvulas, mas em simultâneo o mais leves possíveis para que o robô pudesse manusear as válvulas com a garra manipuladora. Começou-se por desenhar uma flange (Figura 46) de ligação ao braço do robô com furação passante para embutir 12 parafusos DIN 912 M12 de classe métrica 8.8 equidistantes entre si e a 80mm do centro (1 na Figura 47). Esta flange tem um total de 40mm de espessura onde, se encontra também contemplada uma superfície (2 na Figura 47) com 4mm de espessura e geometria oposta a uma cavidade presente na flange do braço do robô para fazer o centramento da mesma e assegurar que depois de embutida, esta não sai da posição. Além desta geometria efetuaram-se 9 furos passantes para utilização de parafusos M10 (3 na Figura 47) que acoplarão 3 ligantes que suportam os braços de maior dimensão da garra manipuladora, 4 furos roscados M8 (4 na Figura 47) para posterior fixação de uma flange que suporta um motoredutor a abordar mais à frente e uma caixa (5 na Figura 47) para embutir um rolamento axial de esferas com escora simples (SKF 51204), também a abordar mais adiante.

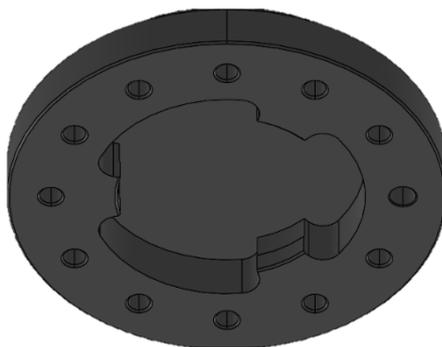


Figura 46 - Flange do braço do robô.

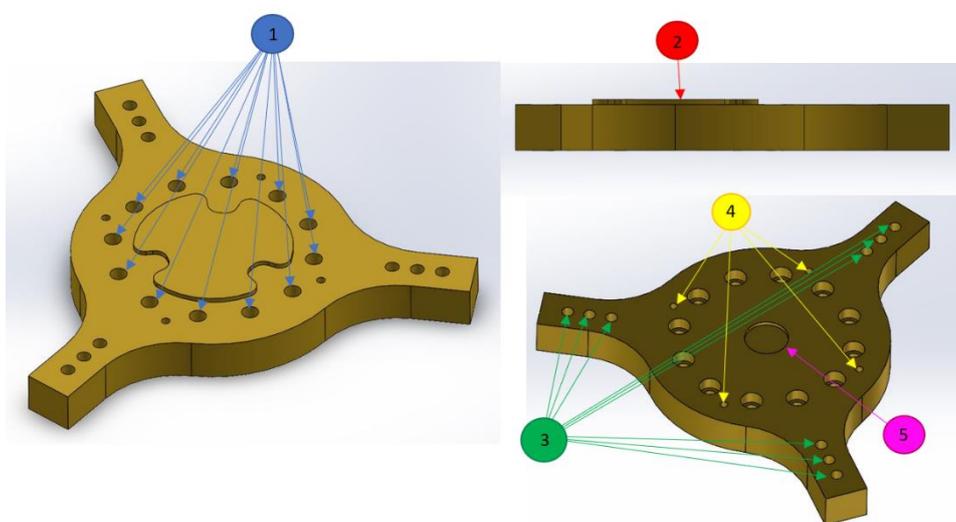
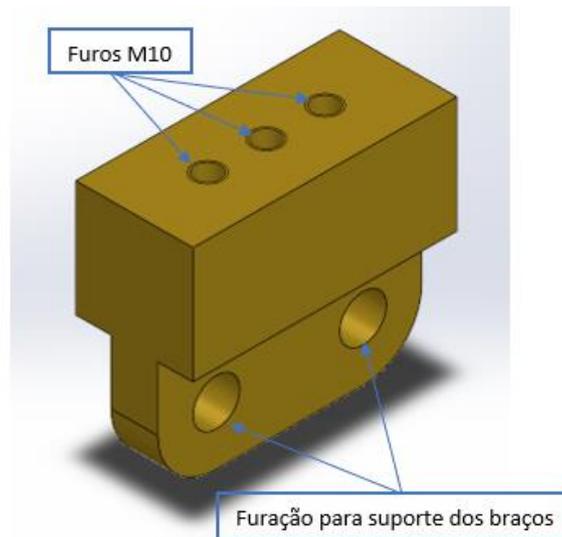


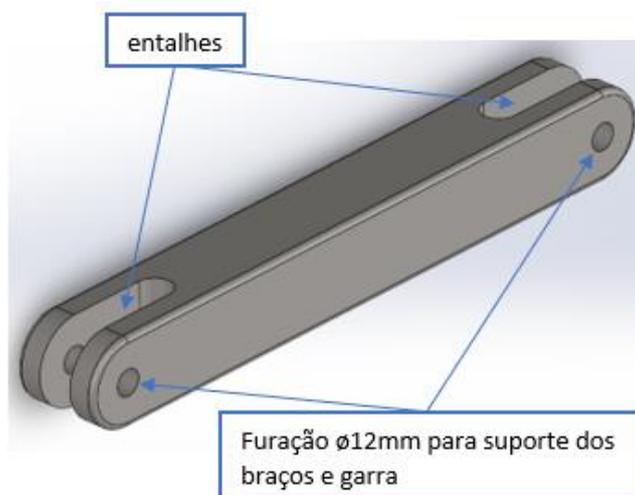
Figura 47 - Flange criada para acoplar o *gripper* ao robô.

Após o desenvolvimento da flange acima abordada, criaram-se três geometrias que são fixadas a esse componente através de parafusos DIN 912 M10 de classe métrica 8.8 e suportam dois braços da garra manipuladora cada uma. Denominaram-se estes componentes por ligantes, uma vez que efetuam a ligação da flange aos braços. Além da furação roscada, existem também, outros dois furos que servem para introduzir parafusos de rosca parcial M10 de classe métrica 8.8 para, assim, suportar os braços da garra manipuladora. Estes furos são de diâmetro superior aos que se encontram presentes nos braços, diâmetro 16mm, para tornar possível a introdução de uns casquilhos plásticos autolubrificantes iglidur® M250 de maneira a evitar o contacto metal/metal e amortecer possíveis vibrações, além destas propriedades, estes casquilhos são extremamente resistentes a sujidade e isentos de lubrificação e manutenção. Logo após a introdução de todos os elementos referidos, utilizaram-se porcas M10 de classe métrica 8.8 para apertar nos parafusos acima mencionados e assim evitar movimentos de translação, ou seja, restringir todo o conjunto apenas ao movimento de rotação sobre os eixos dos parafusos. Este componente encontra-se representado na Figura 48.



**Figura 48 - Componente de ligação à flange desenvolvida e que suporta dois braços de maiores dimensões (ligante).**

Os braços de maiores dimensões da garra manipuladora têm um comprimento de 310mm e uma geometria quadrada de 40x40mm, sendo assim robustos para se poder suportar as válvulas de maiores dimensões. As extremidades dos braços são arredondadas para possibilitar a rotação das mesmas quando se está a atuar na garra manipuladora e existem uns entalhes que permitem que estas encaixem nos ligantes e nas garras que serão abordadas mais à frente no presente relatório. Na Figura 49 pode-se observar o braço e as suas características geométricas.



**Figura 49 - Braço de maiores dimensões e características geométricas.**

Estes braços, suportam numa das suas extremidades, as garras (Figura 50) propriamente ditas que, quando se atua no manipulador para este fechar, encostam nas válvulas e assim torna possível o transporte das mesmas. As cotas gerais das garras são de 40x144x102mm e possuem um entalhe com uma abertura de 24mm e profundidade de 14mm para fazer o alojamento das válvulas quando o manipulador se encontra fechado e a fazer pressão nas válvulas. Efetua-se a ligação destes componentes aos braços acima referidos da mesma forma que se ligam estes aos ligantes, recorrendo-se uma vez mais a parafusos e porcas M10 de classe métrica 8.8, bem como casquilhos *iglidur*® M250. As garras possuem um terceiro furo para conectar outros braços de menores dimensões a nível de comprimento que servem para puxar as garras para o centro quando se pretende que o manipulador feche e serão abordados já de seguida.

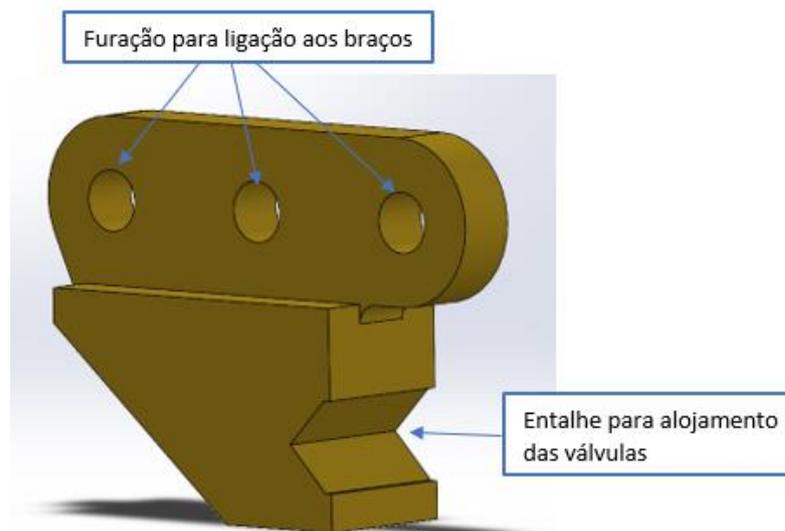


Figura 50 – Garra.

Os braços agora mencionados apresentam uma geometria quadrada de 40x40mm e um comprimento de 200mm, possuem dois furos, um para se efetuar o acoplamento às garras e outro de maiores dimensões para se acoplar os braços a um componente que irá ser descrito mais adiante. Como foi referido, a sua função é puxar as garras para o centro quando se pretende fechar o manipulador. Tal é possível porque estes braços estão conectados a um componente que contém uma porca que sobe e desce através de um parafuso sem fim que será abordado mais adiante. O conceito da articulação do conjunto é, quando a porca sobe pelo parafuso sem fim, os braços de menores dimensões puxam as garras para o centro de modo a fechar o manipulador e os braços de maiores dimensões sustentam as garras que suportam as válvulas. Já o movimento oposto consiste em a porca descer pelo parafuso sem fim, os braços de menores dimensões empurrarem as garras para fora e assim abrir o manipulador. Uma vez mais recorreu-se a porcas e parafusos M10 de classe métrica 8.8 para restringir o conjunto apenas a um movimento de rotação sobre o eixo dos parafusos e utilizaram-se os casquilhos acima referidos num furo de maiores dimensões pelos mesmos motivos já apresentados. O braço mencionado e as suas características geométricas encontram-se representadas na Figura 51.

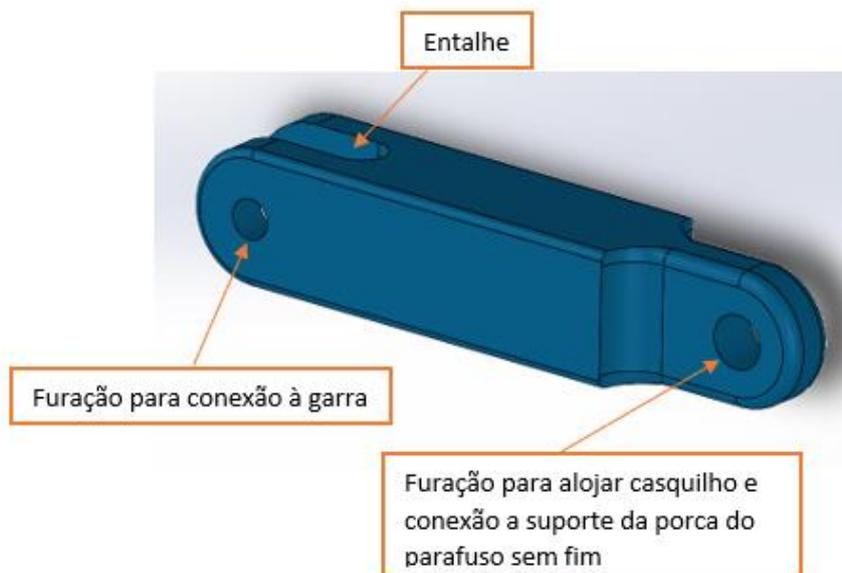


Figura 51 - Braço de menores dimensões e características geométricas.

Depois de desenvolvidos todos estes componentes já ilustrados era necessário dotar o manipulador de movimento. Para tal contactou-se a NORD Portugal, fornecedor de motoredutores *Nord*®, para que nos pudessem indicar a melhor solução para a aplicação em questão. O motoredutor que nos foi indicado e posteriormente utilizado no projeto foi um motoredutor de rosca sem fim SK 1SI50F – IEC63 – 63SP4 (Figura 52) com especificações técnicas representadas na Figura 53.



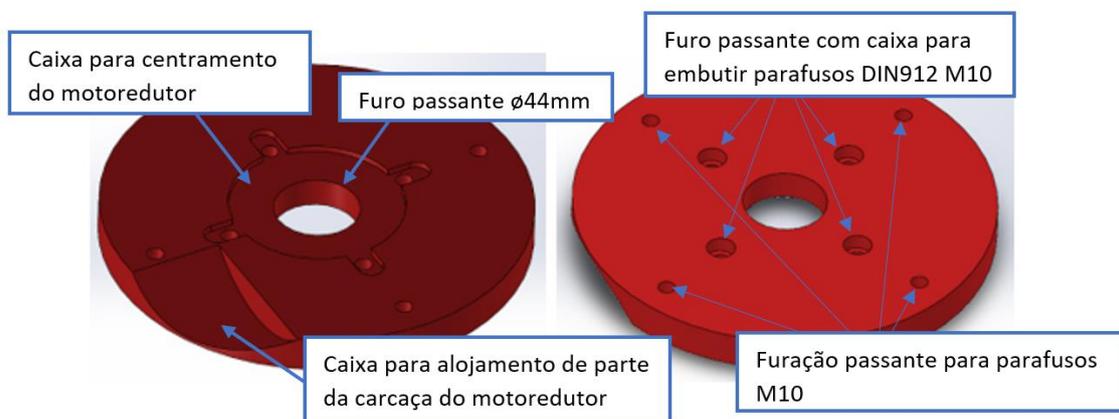
Figura 52 - Motoredutor *Nord*® de rosca sem fim SK 1SI50F – IEC63 – 63SP4. Imagem adaptada de (Nord, 2022).

**Motorreductor de rosca sem fim SI  
com motor NORD IEC  
SK 1SI50F - IEC63 - 63SP/4 B14 C90  
TF**

|                      |   |   |  |
|----------------------|---|---|--|
| Produto              | Sem-fim universal                                     | Veio de saída                             | Eixo oco com chaveta                           |
| Rotação de entrada   | 1370 rpm  | Dimensão do eixo de saída                 | 25H7 mm  |
| Relação de ajuste    | Permite operação em rede ou no inversor de frequência | Material do eixo de saída                 | Padrão   |
| Redução              | 5   | Diâm. flange                              | 160 mm   |
| Rotações à saída     | 274 rpm   | Posição do flange                         | não montado                                    |
| Factor de serviço    | 17,5  | Tipo de Respiro                           | Sem respiro                                    |
| Binário de saída     | 3,8 Nm  | Gearbox Sealing Options                   | Standard Shaft Seal                            |
| Força radial máx.    | 4,8 kN  | Opções                                    | Flange B5                                      |
| Força axial máx.     | 4,9 kN  | Opções                                    | Flange I. D = 160mm (60593800)                 |
| Potência             | 0,12 kW   | Tipo de rolamento                         | Mancal normal                                  |
| Tensão alimentação   | 230/400 V   | Resfriamento                              | ventilador (standard)                          |
| Frequência           | 50 Hz   | Posição da caixa de bornes                | 3  |
| Classe de rendimento | IE3   | Entrada de cabos                          | II   |
| Corrente nominal 1   | 0,68 A  | Pressa-cabos                              | nenhuma  |
| Corrente nominal 2   | 0,39 A  | Marcação Adicional na Placa Identificação | Padrão   |
| cos phi              | 0,66  | Placa Identificação do Material           | Padrão   |
| Flange do motor      | B14 C90   | Opção de motor                            | Termistor                                      |
| Modo de operação     | Funcionamento contínuo                                | Brake Corrosion/Dust Protection           |  |
| Grau de proteção     | Grau de proteção IP55                                 | Classificação do Óleo                     | Óleo sintético ISO VG 680                      |
| Isolação             | F   | Quantidade de lubrificante                | 0,095 l  |
| Posição de montagem  | M6  | Tratamento de superfície                  | Sem tratamento de superfície sem pintura (F 0) |
| Material da carcaça  | Aluminum Housing                                      | Pintura                                   |  |
| Tipo de Carcaça      | Montagem com flange (F)                               | Peso                                      | 9,00 kg  |
| Cilindro IEC         | IEC63   | Prazo de entrega estimado                 | Padrão   |
| Veio de saída        | Módulo Sem Fim com eixo oco de 25mm com chaveta       |   |  |

**Figura 53 - Especificações técnicas do motoredutor Nord® de rosca sem fim SK 1SI50F – IEC63 – 63SP4. Imagem adaptada de (Nord, 2022).**

De maneira a acoplar o motoredutor selecionado ao manipulador, desenvolveu-se uma flange de ligação à flange que liga ao braço do robô. Esta flange tem 220mm de diâmetro e 19.5mm de espessura, possui na sua geometria uma caixa para centramento do motoredutor, furação para embutir 4 parafusos DIN 912 M8 de classe métrica 8.8 que fixam o motoredutor à flange, 4 furos passantes para parafusos M8 que ligam esta flange à que se encontra acoplada ao braço do robô, 1 furo passante com diâmetro 44mm para que um rolamento axial de esferas possa girar livremente no eixo deste furo e, por fim, uma caixa para alojar parte da carcaça do motor, conforme se encontra representado na Figura 54.



**Figura 54 – Flange de suporte do motoredutor e características geométricas.**

Este motoredutor transmite movimento rotacional a um parafuso sem fim de rosca trapezoidal M24 que o transforma em movimento linear através de uma porca que sobe ou desce sobre ele e assim fecha ou abre o manipulador, respectivamente. Optou-se por utilizar rosca trapezoidal por ser o tipo de rosca mais vocacionado para posicionamentos de cargas elevadas devido à sua característica de autotravamento, isto é, não permitir que o peso da carga faça a porca descer pelo parafuso sem fim e com isto não foi necessário utilizar nenhum tipo de travamento adicional. É conferido movimento ao parafuso sem fim através de um escatel alojado na geometria do mesmo uma vez que o eixo do motoredutor é oco. O parafuso sem fim apresenta a geometria ilustrada na Figura 55, diâmetro 25 na parte não rosçada, 300mm de comprimento, 200mm de comprimento de rosca e um furo M10 para se fixar um componente que suporta um rolamento axial de esferas *SKF® 51204*, a abordar de seguida.

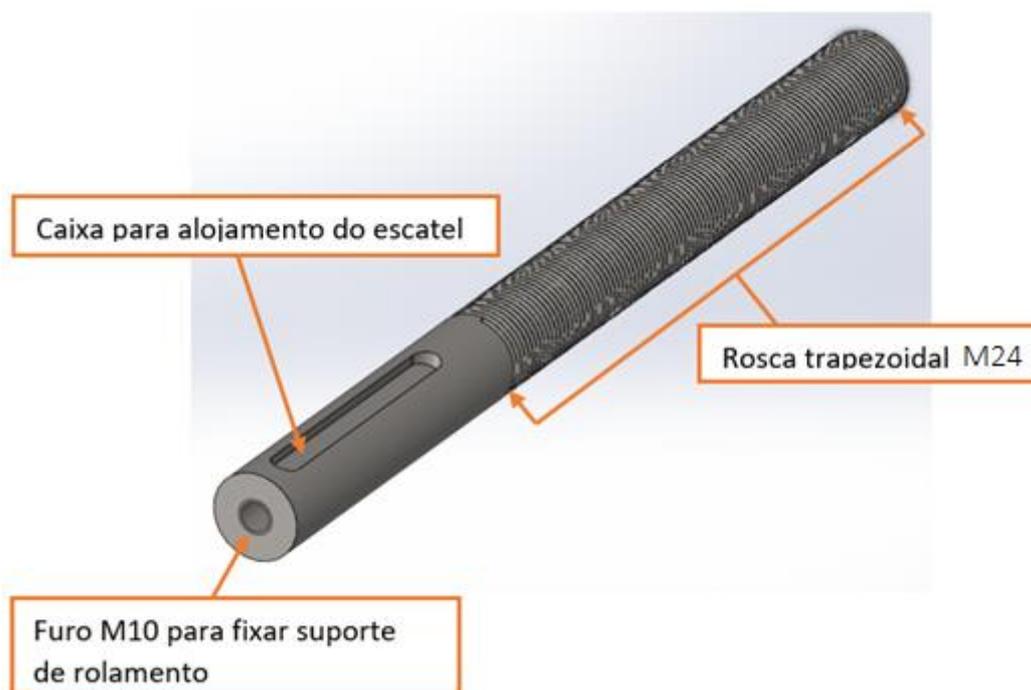


Figura 55 - Parafuso sem-fim M24.

Para que o parafuso sem fim não tivesse tendência a subir pelo bloco do motoredutor e colidir com a flange de ligação ao robô ou cair para fora do bloco, foi necessário anular a possibilidade de ocorrer esse tipo de movimentações. Para tal, desenvolveu-se um componente como o ilustrado na Figura 56 com 6.6mm de espessura que, é fixo ao parafuso sem fim através de um parafuso DIN 912 M10 de classe métrica 8.8 e, como tem um diâmetro superior ao do eixo oco da caixa do motoredutor, diâmetro 40mm, não permite que o parafuso sem fim caia para fora do mesmo. Para que o parafuso sem fim não suba e colida com a flange mencionada, alojou-se um rolamento axial de esferas *SKF® 51204* (Figura 57), com um maço de madeira, neste componente e na caixa existente da flange de ligação ao braço do robô, por se tratar de furos H7 e o rolamento, um veio j6, o que se traduz num ajustamento de classe ligeiramente preso. Na Figura 58 encontra-se ilustrada a forma como estes componentes se encontram montados entre si.

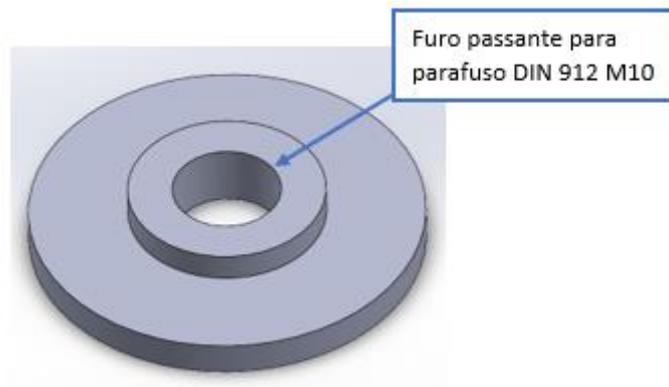


Figura 56 - Componente que assegura que o parafuso sem-fim não caia nem suba pelo bloco do motoredutor.



Figura 57 - Rolamento SKF® 51204. Imagem adaptada de (SKF, 2022).

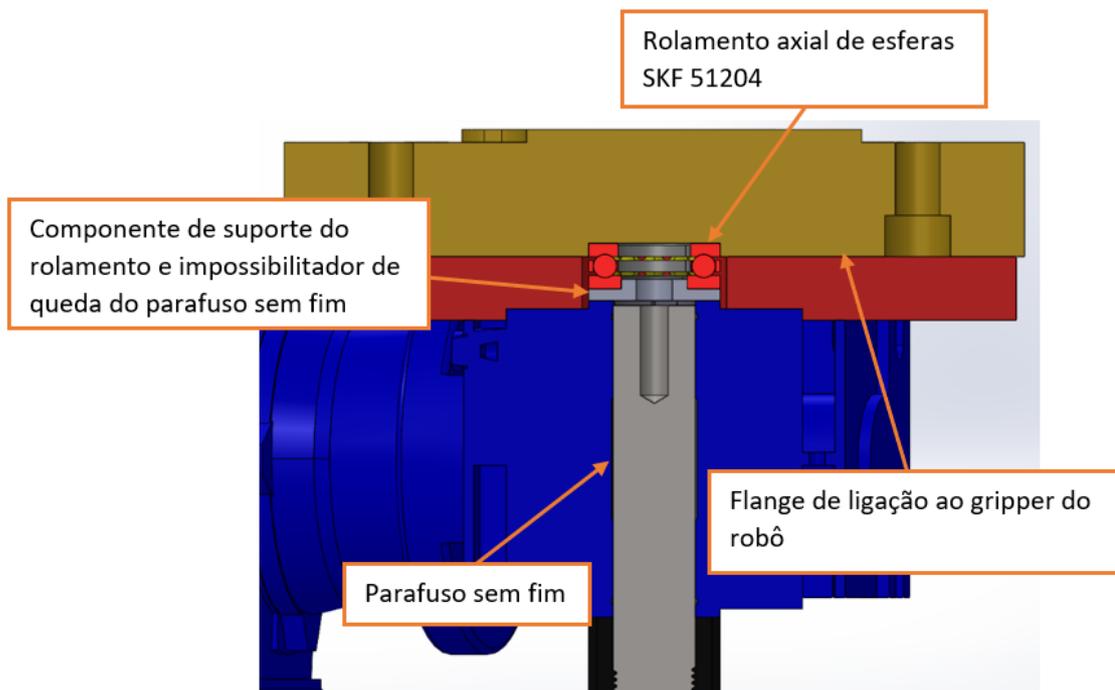


Figura 58 - Acoplamento dos componentes das Figuras 47, 52, 54, 55, 56 e 57.

A porca que efetua o movimento linear através do parafuso sem fim trata-se de uma porca trapezoidal ISO conforme DIN 103 em bronze e com geometria e dimensões ilustradas na Figura 59. Posteriormente foi realizado um entalhe na geometria da porca para que uma cavilha, a abordar mais à frente, trave o seu movimento rotacional e assim restrinja a porca somente a movimento linear (Figura 60).

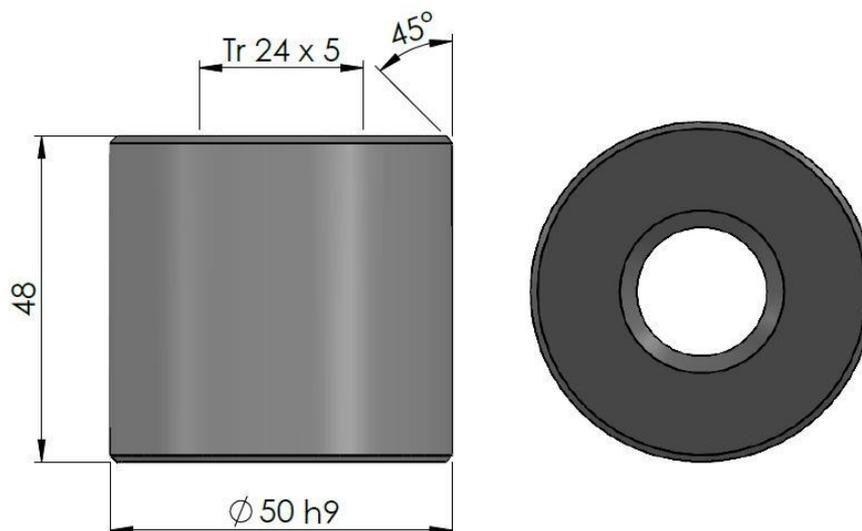


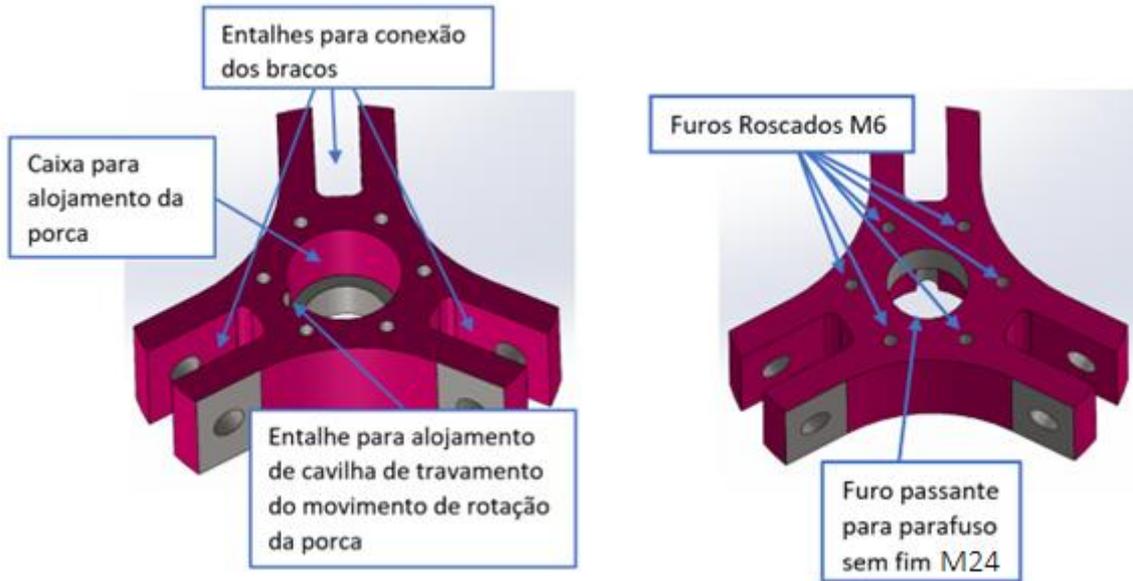
Figura 59 - Porca trapezoidal ISO conforme DIN 103 em bronze.



Figura 60 - Entalhe realizado na geometria da porca ilustrada na Figura 59.

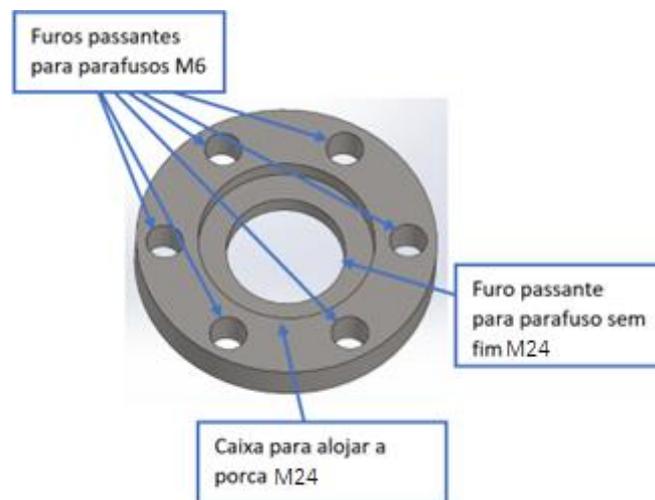
Esta porca encontra-se contida num suporte que além de ter a função de alojamento da mesma, efetua também a conexão aos braços de menor dimensão, assim quando a porca sobe ou desce pelo parafuso sem fim, este componente puxa os braços para o centro ou empurra-os para o exterior, respetivamente, efetuando assim o movimento de fecho ou abertura da garra manipuladora. Esta geometria apresenta três entalhes para permitir a conexão aos braços de menores dimensões, conexão esta realizada através de parafuso e porcas M10 de classe 8.8 iguais aos referidos anteriormente, um entalhe para alojar a cavilha de travamento do movimento rotacional da porca,

uma caixa para alojamento da porca, 6 furos roscados M6 para fixação de uma tampa que retém a porca e a cavilha dentro do suporte e um furo passante para permitir que o parafuso sem fim atavesse esta geometria. Este componente encontra-se representado na Figura 61.



**Figura 61 - Componente de alojamento da porca referida na Figura 60 e de acoplamento aos braços de menores dimensões.**

A cavilha mencionada anteriormente trata-se de uma geometria cilíndrica com 8mm de diâmetro e 38mm de comprimento e encontra-se alojada dentro do suporte da porca e retida no interior do mesmo através da tampa representada na Figura 62. Caracteriza-se por ser uma geometria também ela cilíndrica com 65mm de diâmetro e 10mm de espessura. Na sua geometria apresenta, um caixa para alojamento da porca, 6 furos passantes para fixação da mesma ao suporte da porca através de parafusos DIN 912 M6 de classe métrica 8.8 e um furo passante para permitir que o parafuso sem fim M24 atavesse a mesma.



**Figura 62 - Tampa para retenção da porca M24 dentro do componente da Figura 61.**

Nas seguintes Figuras 63, 64, 65 e 66 encontra-se esquematizada a maneira como os diferentes componentes se ligam entre si.

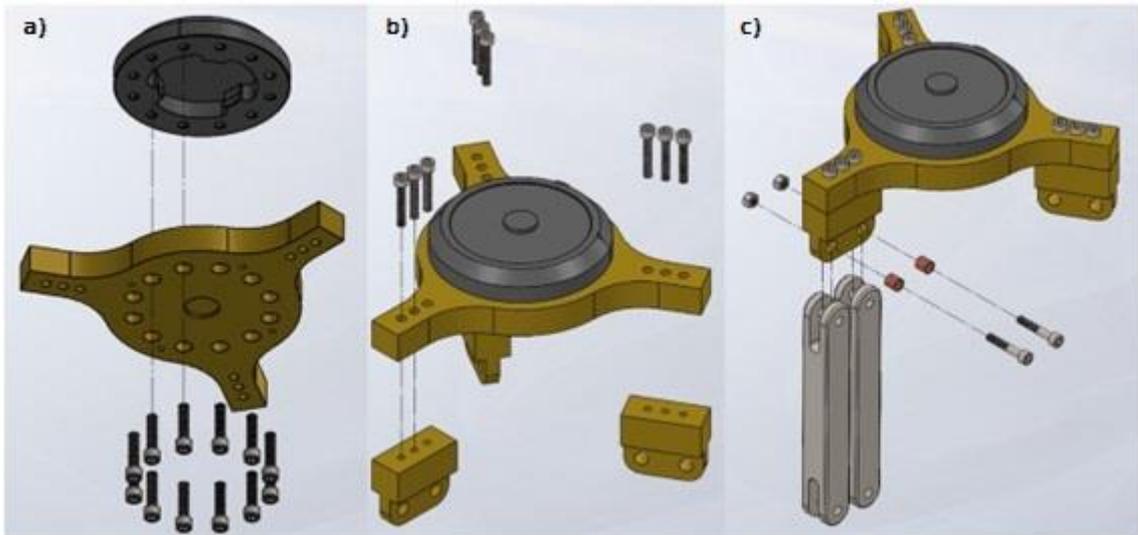


Figura 63 – a) Conexão da flange do *gripper* à flange do robô; b) Conexão dos ligantes à flange do *gripper*; c) Conexão do braço de maiores dimensões aos ligantes.

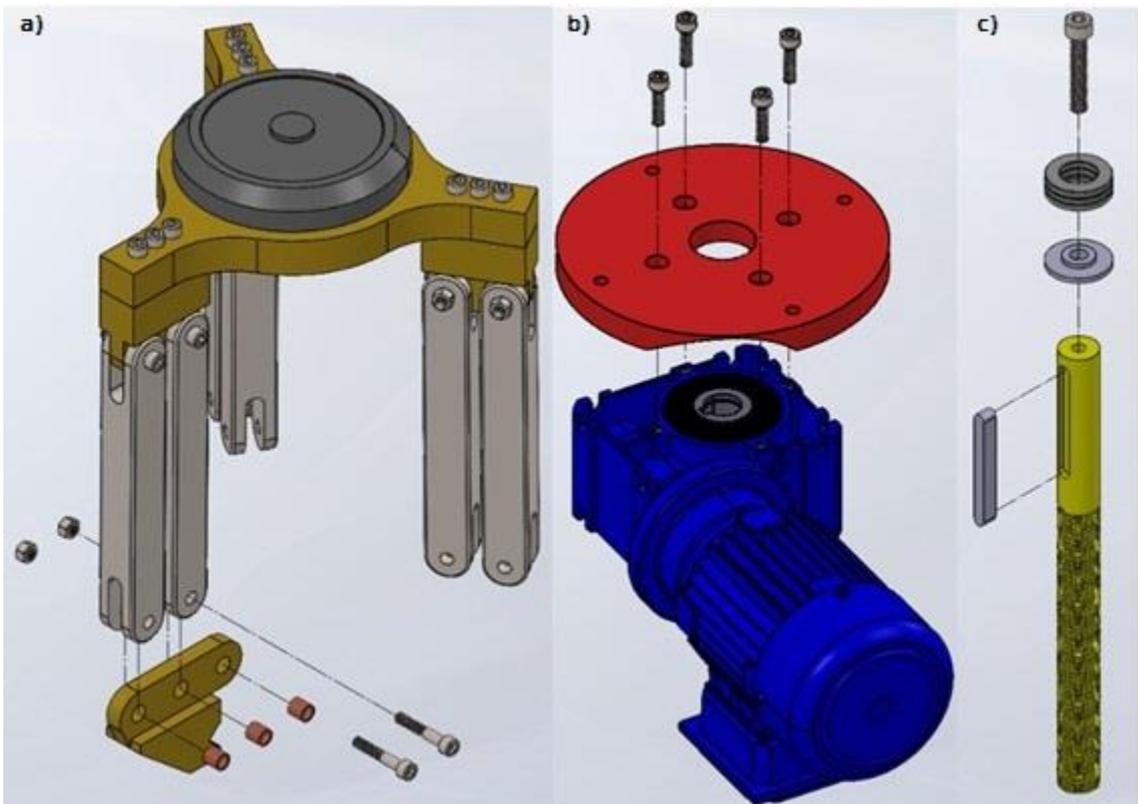


Figura 64 – a) Conexão da garra aos braços de maiores dimensões; b) Conexão do motoredutor à flange de suporte do mesmo; c) Conexão do escatel e do componente que assegura que o parafuso sem-fim não cai nem sobe pelo bloco do motoredutor ao parafuso sem-fim e rolamento a este componente.

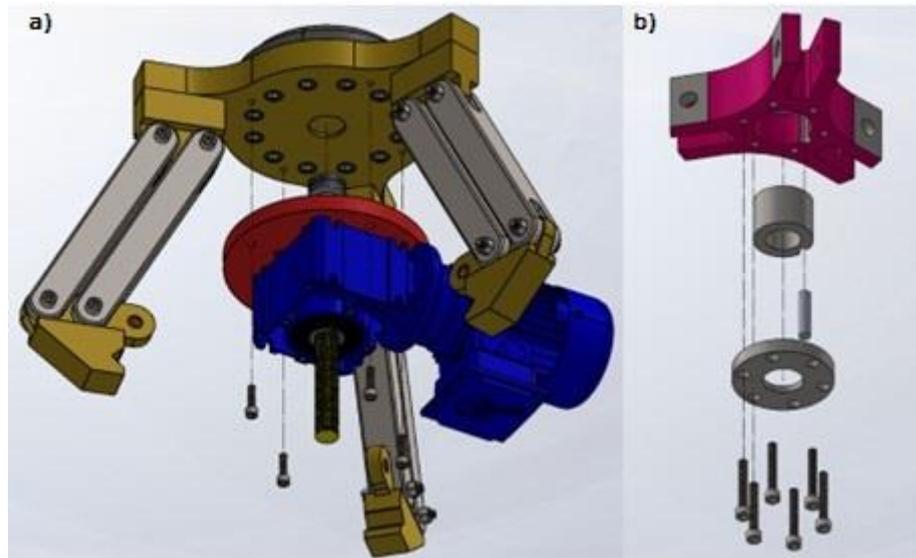


Figura 65 – a) Conexão da flange de suporte do motoredutor à flange do *gripper*; b) Conexão da porca ao componente de alojamento da mesma e à tampa e cavilha.

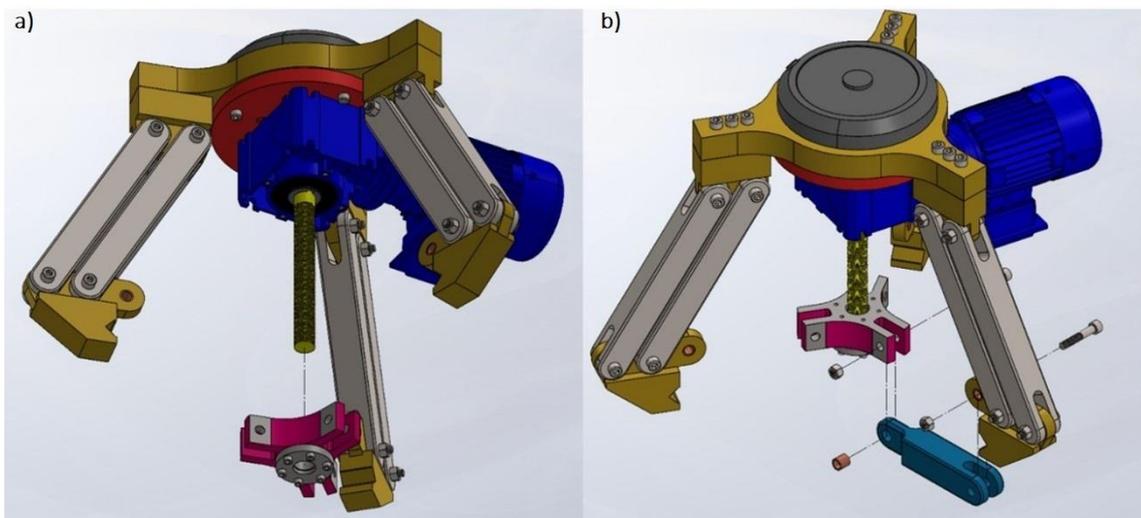


Figura 66 – a) Conexão do componente de alojamento da porca ao parafuso sem-fim; b) Conexão do braço de menores dimensões ao componente de alojamento da porca e à garra.

Obtendo-se a geometria final representada na Figura 67.

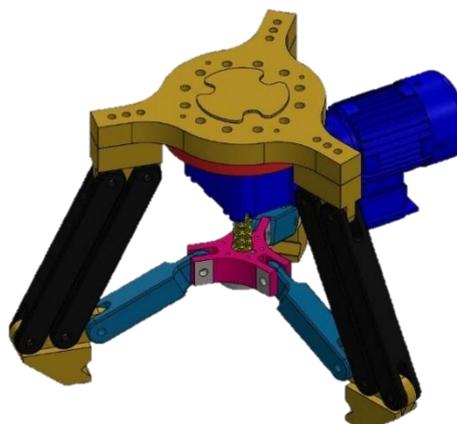


Figura 67 - Geometria final do *gripper*.

Depois de elaborado o modelo virtual, atribui-se os materiais aos componentes que o constituem. Todos os componentes a serem maquinados definiu-se que seriam em aço F10 AISI 1045 por causa das suas propriedades mecânicas e vasto campo de aplicação na área da metalomecânica e a porca é em bronze Rg7 (CC 493K), as propriedades mecânicas destes materiais encontram-se enumeradas na Tabela 1. Recorrendo ao comando *Mass Evaluate* do *Solidworks®*, obteve-se uma massa para o conjunto, *gripper* e válvula de maiores dimensões de aproximadamente 165.64Kg, para tal foi necessário atribuir o material constituinte à válvula, neste caso o ferro fundido cinzento e, obteve-se também, um centro de gravidade com as cotas representadas na Figura 68 para o posicionamento mais desfavorável da garra manipuladora. A Figura 69 representa a localização do centro de gravidade no modelo.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no *gripper*.

|           | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | $\sigma_{ced}$ (MPa) | $\sigma_R$ (MPa) | E (GPa)(T=20°C) | $\mu$ | $\epsilon_R$ (%) | HB  | G (GPa) |
|-----------|--------------------------------|----------------------|------------------|-----------------|-------|------------------|-----|---------|
| AISI 1045 | 7.87                           | 450                  | 585              | 200             | 0.29  | 12               | 163 | 80      |
| CC 493K   | 8.8                            | 120                  | 260              | 115             | 0.28  | 12               | 70  | 44      |

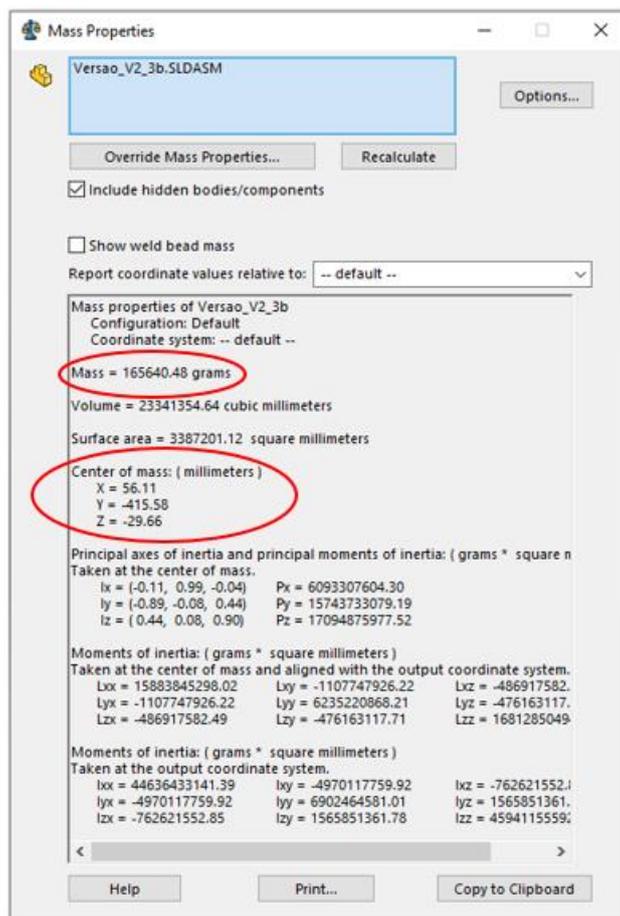


Figura 68 - Massa do conjunto (*gripper* e válvula de maiores dimensões) e centro de gravidade.

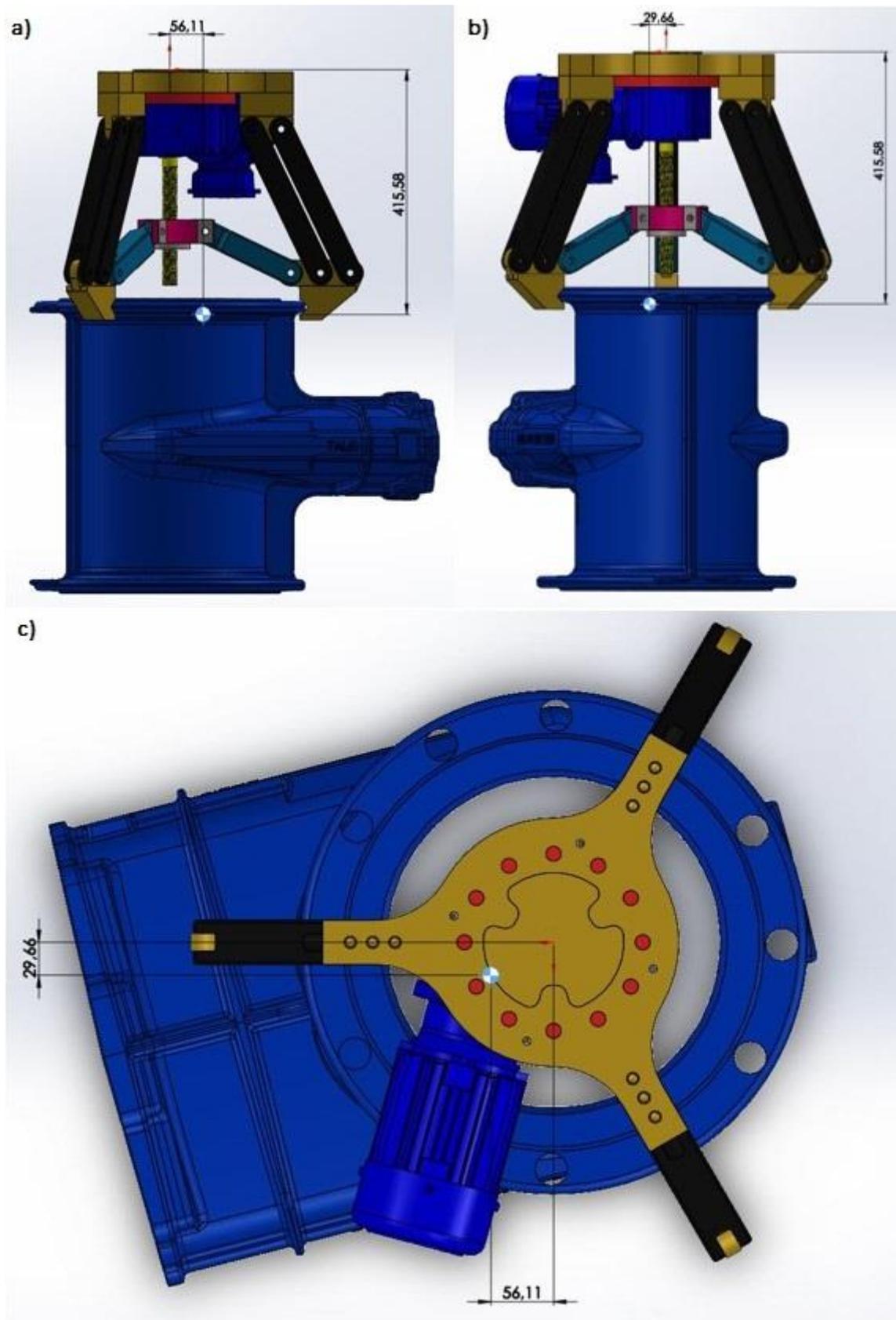


Figura 69 - Localização do centro de gravidade.

Posto isto, foi necessário validar a capacidade de o robô suportar todo o conjunto e conseguir efetuar as manobras necessárias para a utilização pretendida ou, caso não tivesse capacidade para tal, seria necessário utilizar um robô diferente, de maior capacidade ou, redesenhar a garra manipuladora. Através da Figura 70, retirada da ficha técnica do robô, traçando uma linha com o valor da cota em Z (Y na Figura 69) pode-se observar que o robô é capaz de efetuar o movimento pretendido pois as cotas em L (X e Z na Fig. 69) encontram-se dentro da região dos 190Kg, o que permite concluir com segurança que o robô é perfeitamente capaz de manobrar este *gripper*.

IRB 6700-235/2.65

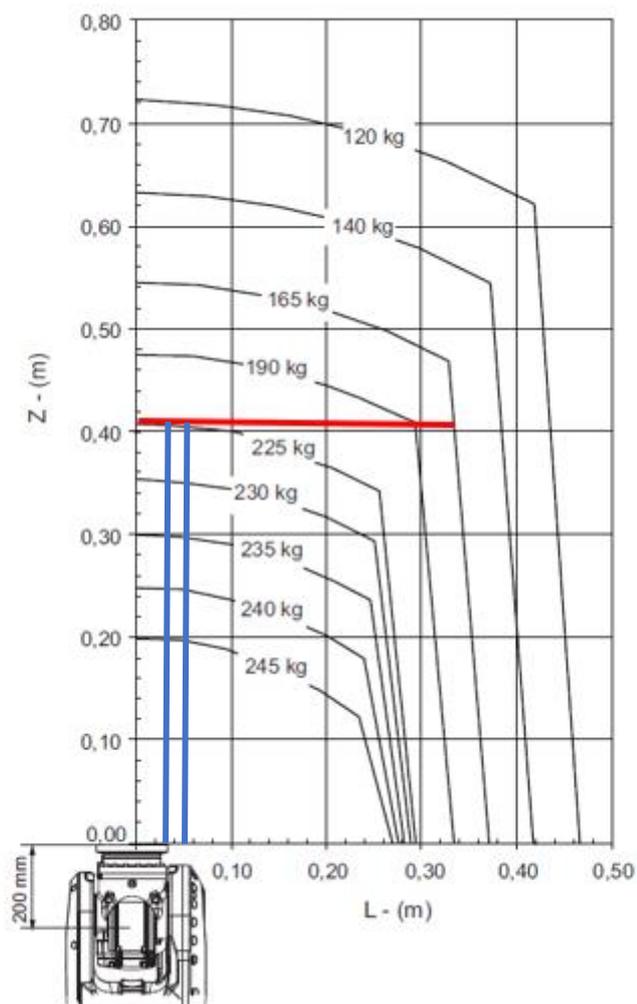


Figura 70 – Validação da capacidade de carga do robô. Imagem adaptada de (ABB, 2022).

Estando o robô validado, efetuou-se um estudo numérico, recorrendo à ferramenta de elementos finitos do *Solidworks®* para validar o modelo desenvolvido neste projeto e assim, caso o modelo fosse válido, efetuar a maquinação dos seus componentes e montagem da garra manipuladora para poder ser aplicada no robô. O resultado do estudo mostrou que a garra manipuladora foi bem dimensionada e que, portanto, o projeto poderia passar à fase de produção. O estudo será apresentado mais adiante neste relatório num capítulo dedicado à parte de estudos por elementos finitos.

A maquinação de alguns dos componentes e geometrias pós-maquinação que constituem a garra manipuladora pode-se observar nas Figuras 71 e 72 respetivamente.



Figura 71 - Maquinação de alguns componentes que constituem o *gripper*.

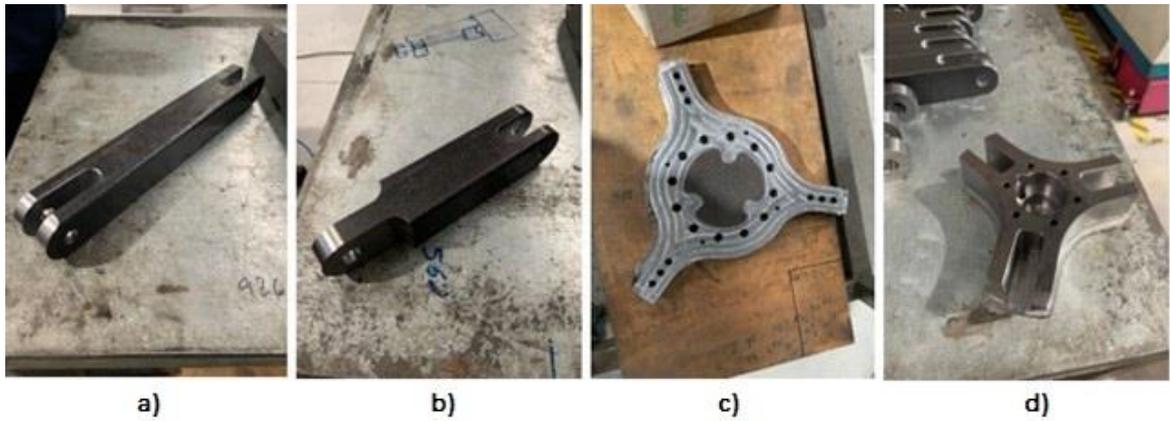


Figura 72 - Pós-Maquinação de alguns componentes que constituem o *gripper*.

Na Figura 73 está representada a geometria final do *gripper* acoplado a um robô para ensaio.



**Figura 73 - *Gripper* (garra manipuladora) acoplada a um robô para ensaio.**

#### 4.4 – Elaboração de Maquete 3D e Descrição da Tecnologia Utilizada

Com o intuito de se celebrar o sexto aniversário da empresa e dar a conhecer aos clientes um pouco da área em que a empresa atua, desenvolveu-se uma maquete 3D através de prototipagem rápida, de uma estufa de alívio de tensões residuais, por ter sido um projeto recente e bem referenciado no mercado. Esta maquete ficou exposta na empresa e a perspetiva futura passa por desenvolver mais maquetes de outros projetos desenvolvidos para se criar um showroom e assim dar a conhecer alguns dos projetos realizados ao longo do tempo.

O projeto em questão, trata-se de uma estufa de alívio de tensões residuais (Figura 74). Este desafio passou primeiramente pela perceção de como poderia ser dividido o modelo CAD, recorrendo ao programa *Soliworks*®, para que cada módulo (divisão do modelo) pudesse ser impresso posteriormente na orientação mais favorável. Dividiu-se o modelo em cinco módulos diferentes, sendo eles, a estufa (1 na Figura 75), as barreiras de proteção (2 na Figura 75), o sistema de elevação (3 na Figura 75), a mesa de alimentação e extração (4 na Figura 75) e o armário (5 na Figura 75). Ainda dentro destes módulos, existiu a necessidade de se dividir o módulo da mesa de alimentação e extração, do sistema elevatório e das barreiras de proteção em várias peças (que posteriormente foram coladas para se obter a geometria pretendida) para se conseguir posicionar e imprimir as peças numa orientação que melhor as favorecesse a nível de acabamento superficial.



Figura 74 - Estufa de alívio de tensões residuais.

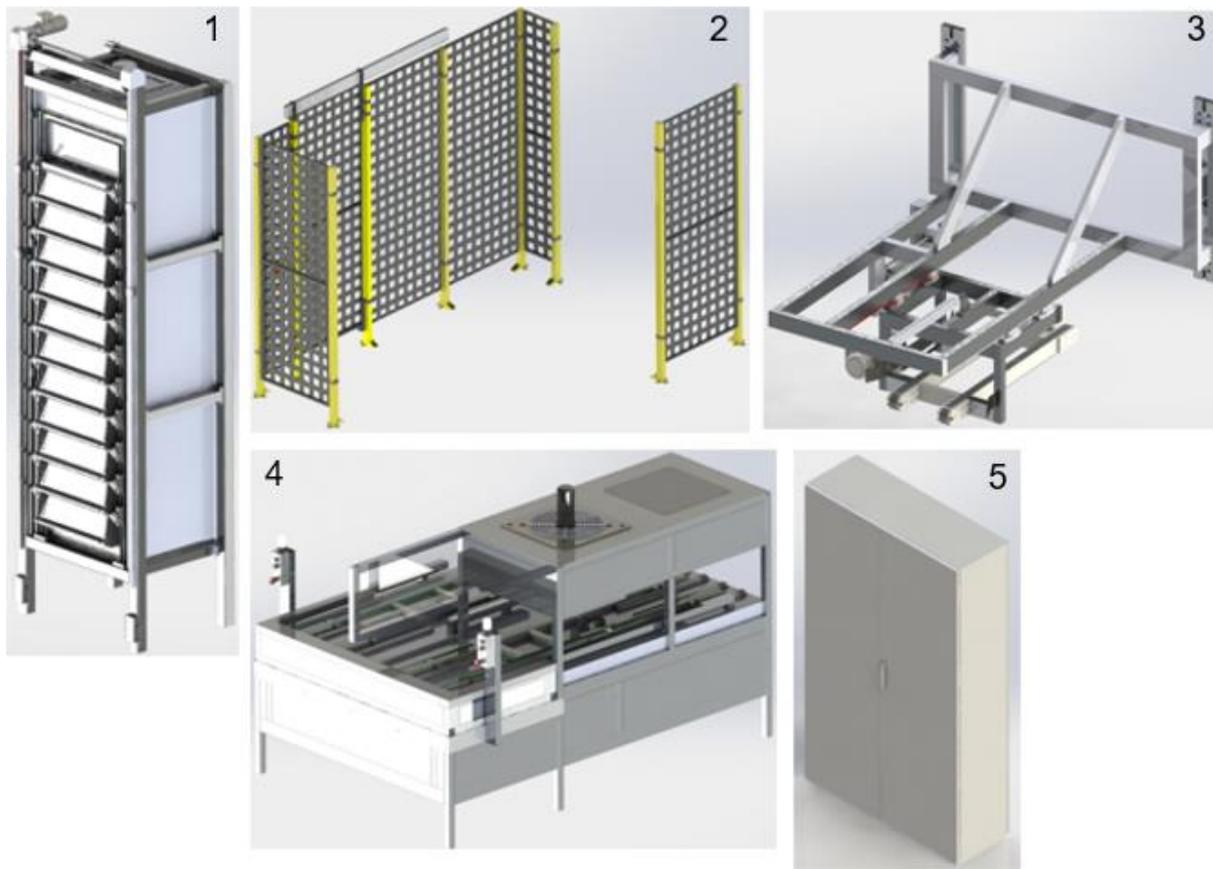


Figura 75 - Módulos em que se dividiu a estufa de alívio de tensões residuais.

Logo após a divisão do modelo em vários módulos, e alguns destes módulos em peças individuais, foi necessário retirar todos os componentes que se encontrassem no interior dos modelos e, portanto, não visíveis, para se preencher os espaços com material e assim poupar tempo depois na produção da maquete.

Seguidamente efetuou-se uma redução da escala dos modelos, recorrendo ao comando *scale* do *Solidworks*®, para que fosse possível imprimir a maquete, uma vez que o tamanho real do equipamento ultrapassa, em grande escala, o espaço útil do equipamento utilizado para a elaboração da maquete.

Além da eliminação dos componentes interiores e da redução da escala, simplificou-se também algumas geometrias mais complexas, pois, dado que, uma escala tão reduzida do modelo do equipamento não dava para perceber detalhadamente estas geometrias, era tempo de impressão desperdiçado, bem como material.

Finalmente, depois de se obter as geometrias finais a serem impressas, converteu-se os ficheiros para ficheiros.STL e importaram-se para o software de prototipagem rápida utilizado na empresa para se poder posicionar as geometrias na posição de impressão desejada e dar o comando de início deste processo.

Nas Figuras 76, 77 e 78 pode-se observar a impressão de uma geometria, alguns módulos impressos e a montagem final do modelo, respetivamente.



Figura 76 - Impressão do módulo do armário.



Figura 77 – a) Módulo das barreiras de proteção; b) Estufa; c) Mesa de alimentação e extração.



**Figura 78 - Montagem final da maquete.**

A tecnologia de fabrico utilizada neste projeto foi a prototipagem rápida.

Fazendo uma breve descrição, a prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias utilizadas para fabricar objetos físicos diretamente a partir de fonte de dados, normalmente obtidas recorrendo a tecnologia de CAD. As geometrias podem ser obtidas a partir de programas de modelação 3D (CAD), conversão de arquivos obtidos a partir de scanners 3D, tomografia computadorizada ou ressonância magnética. Trata-se de um processo de adição de material camada a camada e oferece numerosas vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos clássicos de fabrico baseados em remoção de material, nomeadamente o fresamento e o torneamento. Esta tecnologia proporciona a economização de custos e de tempo na produção de modelos que, podem rondar os 70% (Ferretti, 2016), quando comparados aos métodos convencionais, além de que, permite obter geometrias com o mesmo nível de acabamento da produção em série, na chamada produção rápida de um componente. Além disso, no que diz respeito à produção de protótipos, pequenos lotes de peças e geometrias complexas, é o melhor processo de fabrico possível (Ferretti, 2016).

A prototipagem rápida tem como finalidade, permitir a inspeção visual, a avaliação ergonómica, a análise de forma e dimensional, definir um padrão mestre para a produção de ferramentas e/ou obter geometrias de forma rápida.

Os pontos fortes deste processo de fabrico são, a capacidade de se produzir geometrias tridimensionais complexas e com detalhes, a redução de lead times em

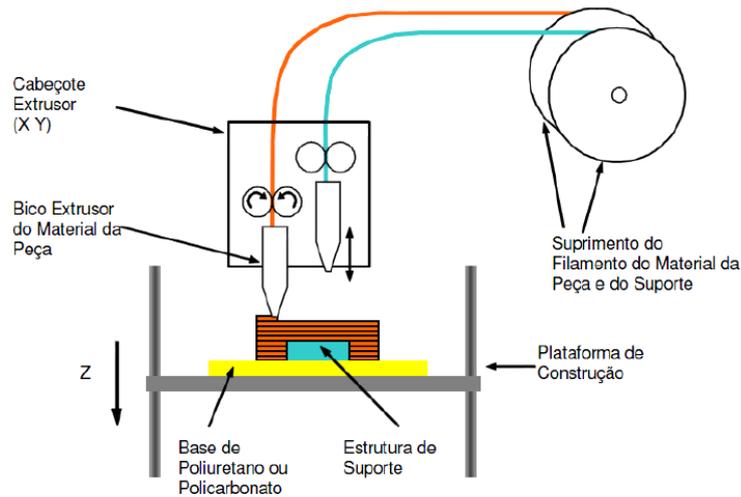
peças únicas, os processos que recorrem a esta tecnologia ocorrem num compartimento fechado com baixa geração de ruídos e desperdícios, a redução significativa do tempo de lançamento de um produto novo no mercado, a melhoria do processo produtivo e redução de custos no projeto de produtos, não requerer dispositivos ou ferramentas especiais para a fixação, quando existe necessidade de se utilizar suportes, a própria tecnologia da máquina cria-os, na maior parte dos casos não é necessária a troca de ferramenta de trabalho, a fabricação de um componente é feita com uma única etapa de processo, não são necessários cálculos complexos de trajetórias de ferramentas.

Como pontos fracos da prototipagem rápida pode-se enumerar a velocidade lenta da produção de um protótipo, dependendo do nível de acabamento final pretendido e das dimensões dos modelos, podendo o processo levar algumas horas e até mesmo alguns dias. Outro ponto fraco que se pode referir é que os materiais utilizados na prototipagem rápida e as suas propriedades mecânicas não são as mesmas dos metais nem dos polímeros geralmente utilizados no produto final e, também, a precisão e acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por maquinagem.

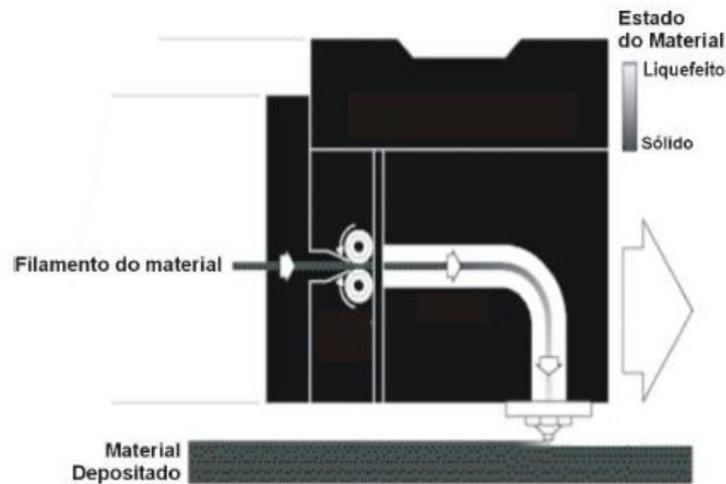
Relativamente à criação de um protótipo, todos os processos de prototipagem rápida existentes atualmente, constituem-se por cinco etapas básicas, a criação de um modelo CAD da peça que se está a projetar, a conversão do ficheiro CAD em formato STL (próprio para estereolitografia), fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais, a construção física do modelo (empilhando-se uma camada de material sobre a outra), e a limpeza e acabamento do protótipo.

Existem diversos processos de fabrico de prototipagem rápida, sendo que o utilizado na empresa é a modelação por fusão e deposição de polímero, denominada também por tecnologia FDM. Trata-se de um processo aditivo que constrói as peças através da deposição de um material termoplástico extrudido. A cabeça injetora traça os polímeros da secção transversal e preenche-os, construindo, assim, camada a camada. Um dos materiais mais utilizados neste processo é o ABS, um polímero de engenharia muito utilizado dado as suas boas propriedades mecânicas, outro material muito utilizado também e o qual foi utilizado para se produzir a maquete em questão descrita neste capítulo é o PLA.

A máquina de FDM possui uma plataforma, revestida de uma bandeja flexível, com movimento vertical (Eixo Z) e um cabeçote equipado com dois bicos extrusores de material aquecidos (um para fazer a alimentação das camadas do modelo e outro para a construção automática dos suportes) (Figura 79). Os bicos extrusores, que funcionam como uma resistência, são alimentados por filamentos do material utilizado, através de duas rodas motorizadas que, vão fazendo com que o material de deposição e de suporte sejam guiados para os bicos de deposição (Figura 80).



**Figura 79 - Esquema de um equipamento de FDM. Imagem adaptada de (Ferretti, 2016).**



**Figura 80 - Alimentação de filamento num bico extrusor e deposição de material. Imagem adaptada de (Ferretti, 2016).**

O software da FDM é um misto de CAD/CAM e não é integrado à máquina. Para cada camada são geradas coordenadas ou caminhos pelos quais o bico extrusor deposita o material fundido. No final de cada camada depositada, a plataforma desce e o cabeçote inicia a deposição de mais material para a nova camada, esta operação vai-se repetindo até à conclusão do modelo.

O processo FDM não desperdiça material durante nem após a produção do protótipo, requerendo pouca necessidade de limpeza, o que permite a sua instalação em ambiente não industriais.

- **Exemplo (FDM) com um dos modelos utilizados para a construção da maquete referida anteriormente:**
  - Modelação do produto a ser prototipado, recorrendo a um software paramétrico 3D (neste caso utilizou-se o *Solidworks®*) (Figura 81);
  - Gravar o modelo num arquivo com extensão STL (Figura 82);
  - Ligar a máquina de prototipagem e abrir o software (Figura 83);
  - Abrir o arquivo STL (Figura 84);
  - Definir a orientação de produção da peça (Figura 85);
  - Processar o ficheiro STL (fatiamento do modelo) (Figura 86);
  - Verificação da posição de produção da peça, conferir parâmetros de construção e mandar imprimir (Figura 87).

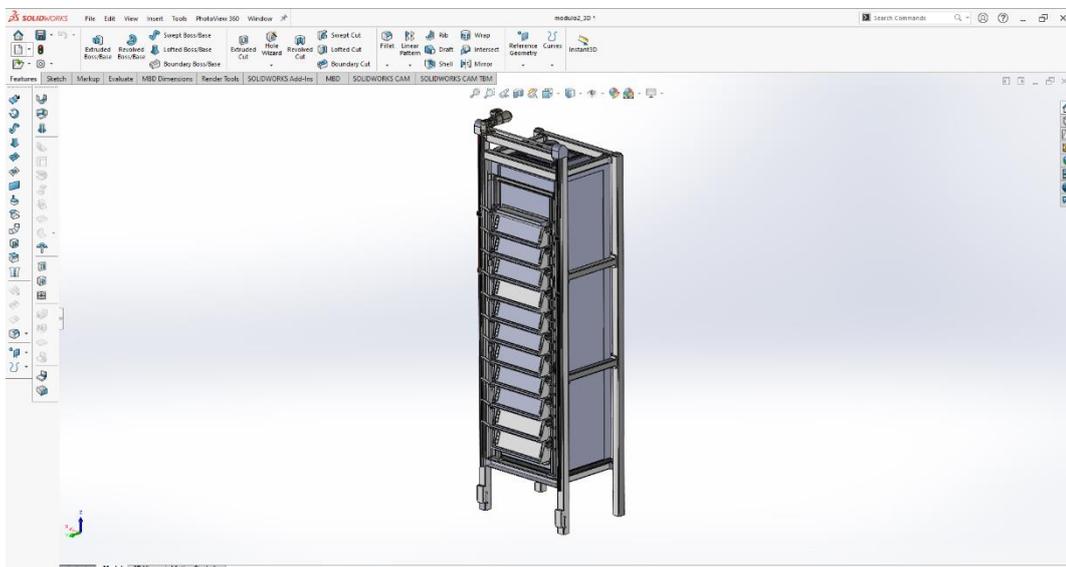


Figura 81 - Modelação 3D CAD do produto a ser prototipado.



Figura 82 - Gravar o modelo em extensão .STL.

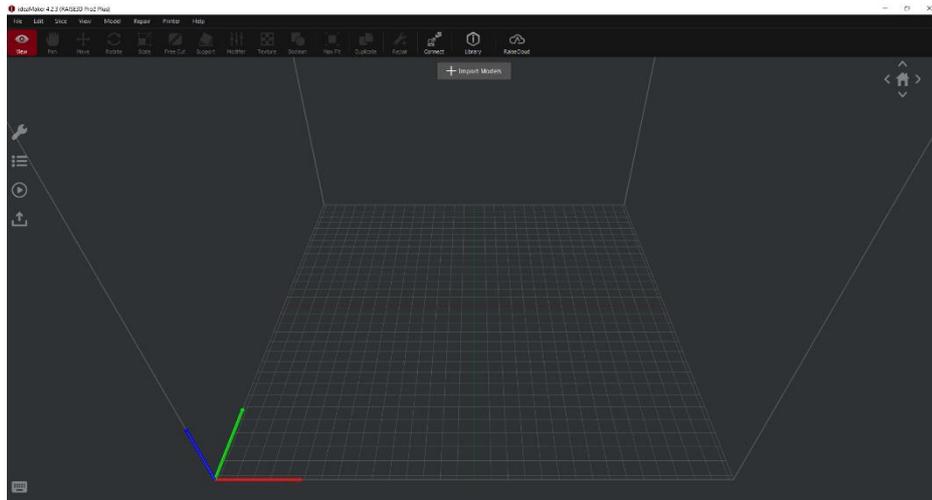


Figura 83 - Abertura do software após a máquina FDM ter sido ligada.

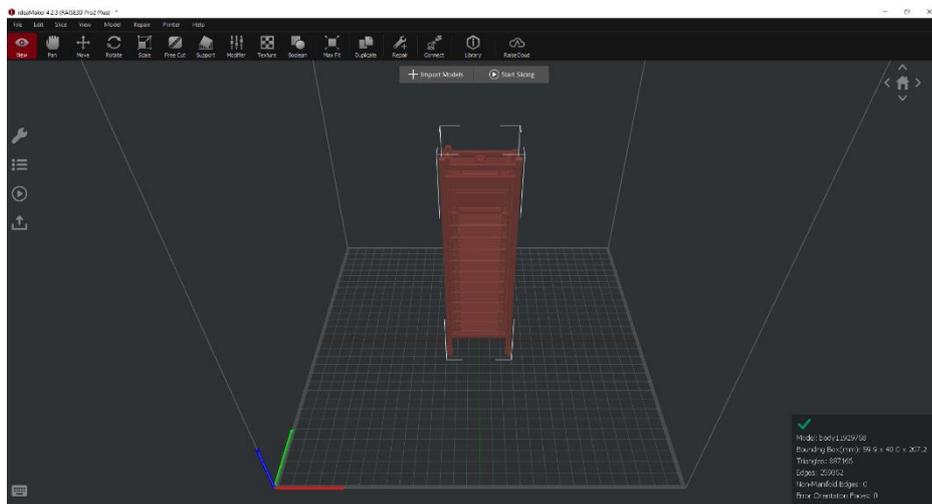


Figura 84 - Abertura do arquivo .STL.

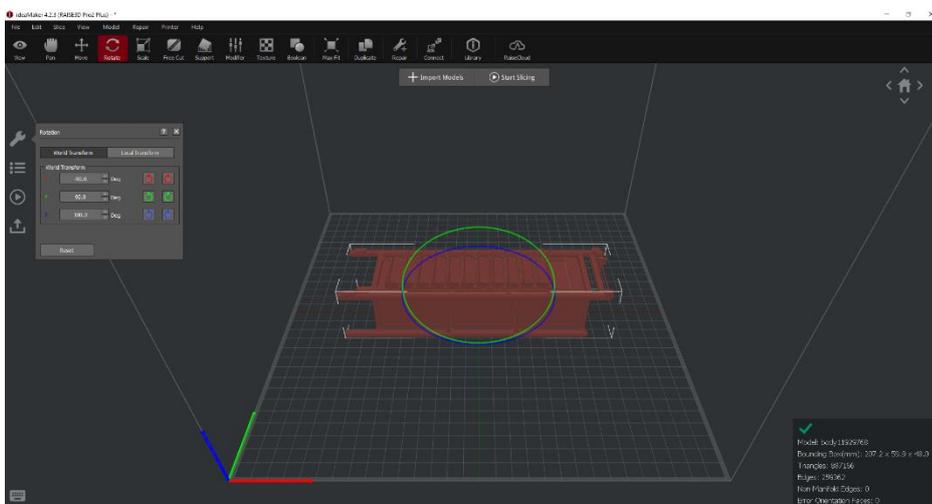


Figura 85 - Definição da orientação de produção do modelo.

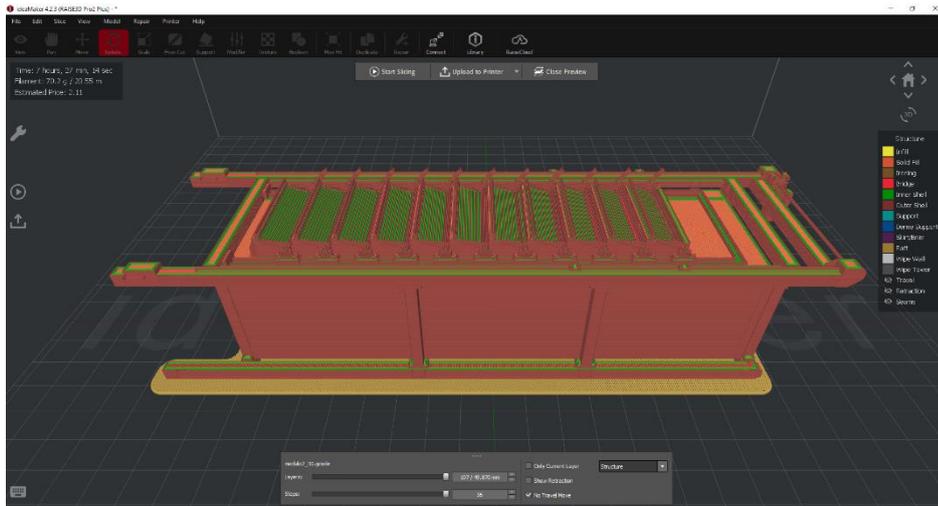


Figura 86 - Processamento do modelo.

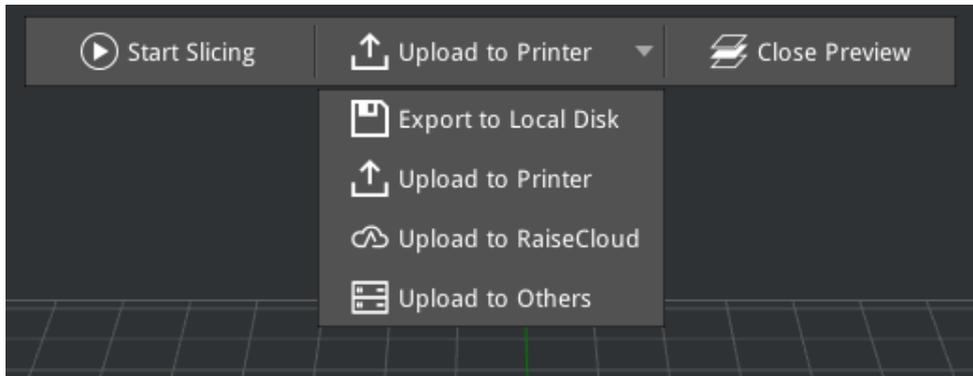
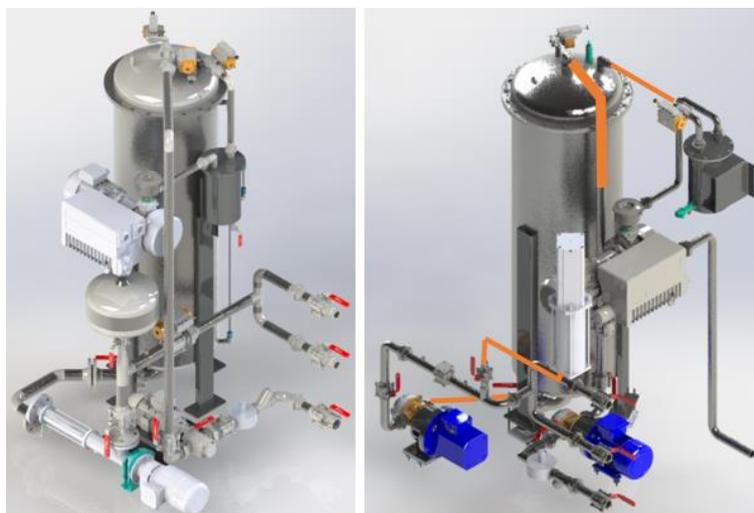


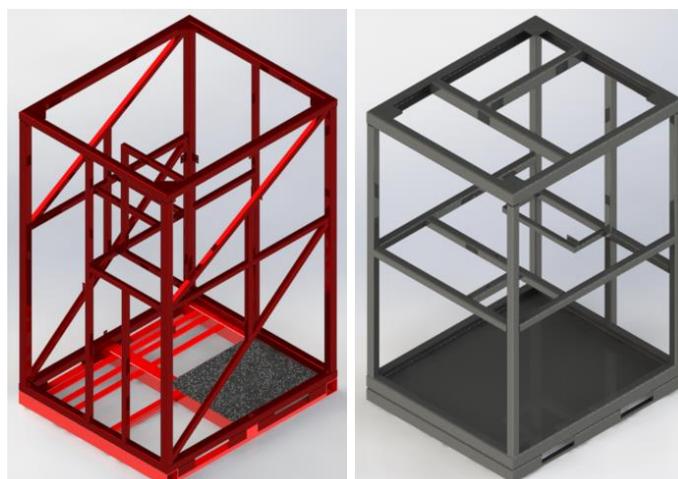
Figura 87 - Ordem de impressão do modelo, após verificação da posição de produção da peça e dos parâmetros de construção.

#### 4.5 – Desgasificador de Resina

Este projeto não consistiu na elaboração do equipamento de raiz, mas sim, pegar na versão já existente do mesmo e, em suma, organizar melhor o posicionamento dos componentes que constituem este equipamento (Figura 88), efetuar uma alteração estrutural de forma a tornar esta mais simples, igualmente reforçada e de fácil acesso ao seu interior (Figura 89), substituir algumas tubagens rígidas por flexíveis (visível na Figura 88, tubagens flexíveis representadas a laranja), substituir o registo de observação do nível de resina por células de carga (Figura 90) e efetuar a substituição dos painéis de blindagem aparafusados por uns de engate e remoção rápidos para, assim, tornar a manutenção do equipamento mais rápida (Figura 91). A versão desenvolvida encontra-se representada na Figura 92, podendo ser comparada com a versão anterior.



**Figura 88 - Reorganização do posicionamento dos componentes constituintes do equipamento. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual.**



**Figura 89 - Alterações ao nível da estrutura. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual.**

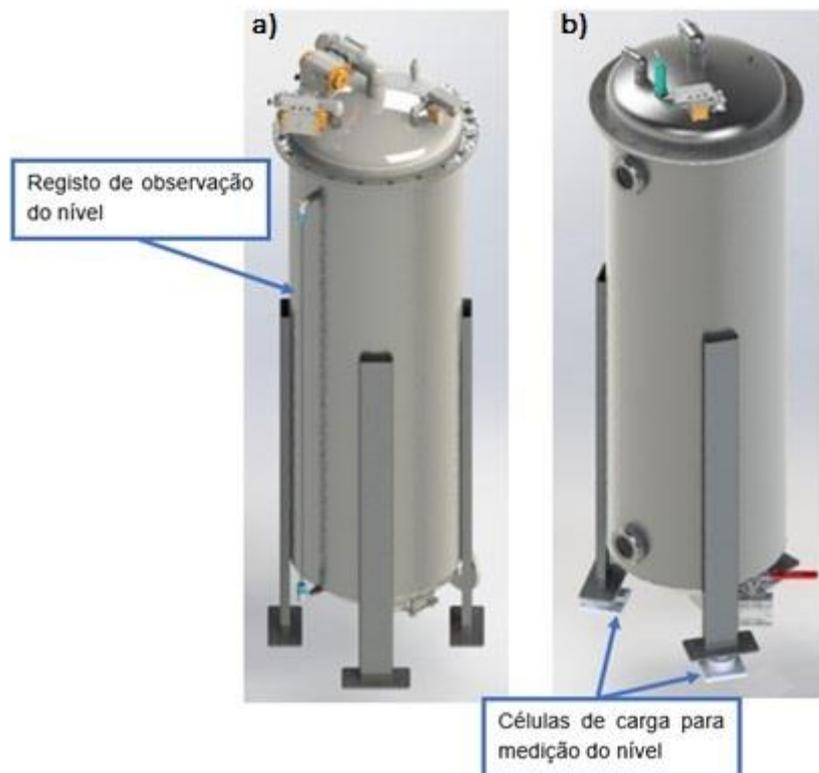


Figura 90 - Substituição do registo de observação do nível de resina por células de carga.  
À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual.

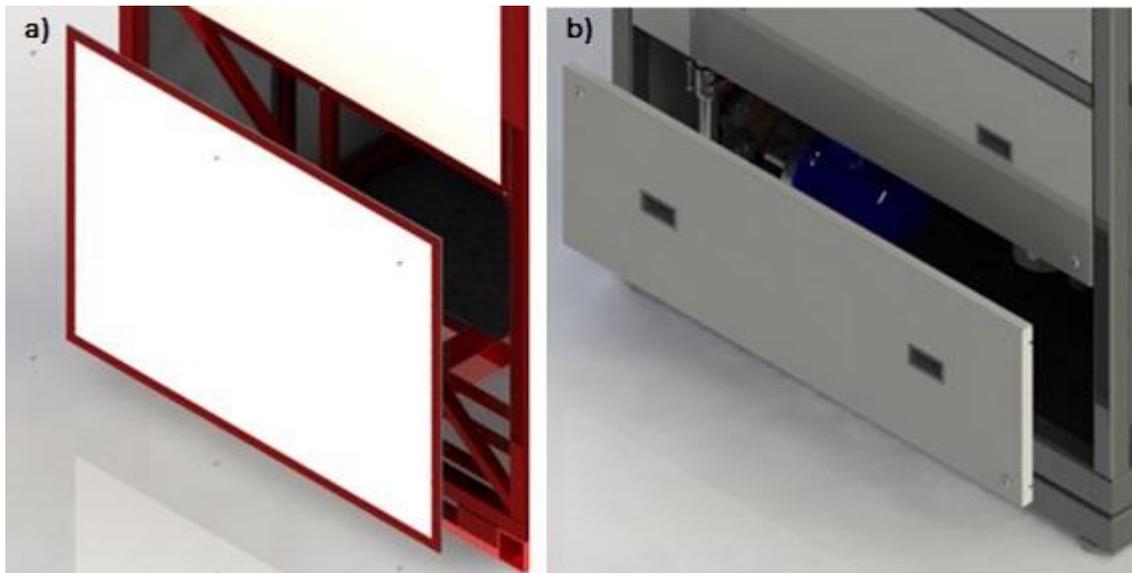
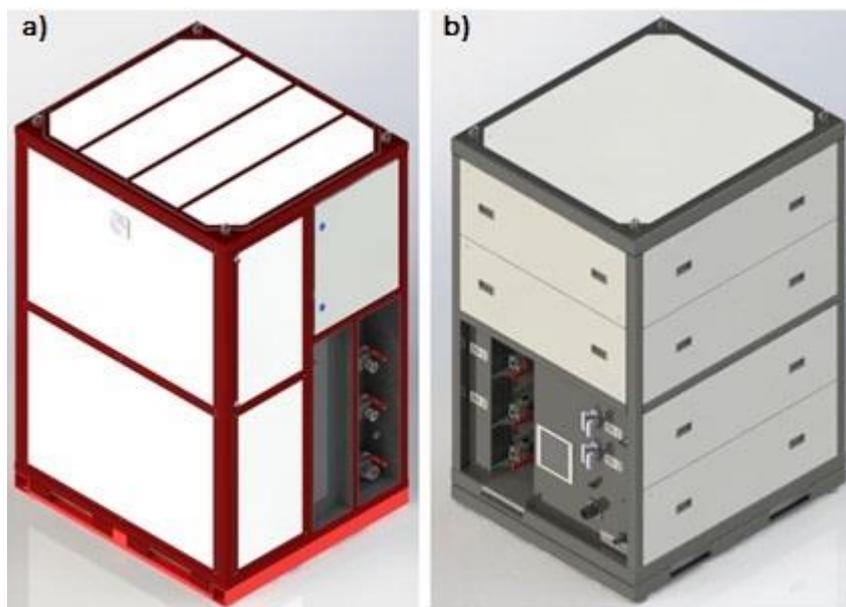


Figura 91 - Substituição dos painéis fixos por ligações aparafusadas por uns de engate rápido.  
À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual.



**Figura 92 - Comparação entre as duas versões finais do equipamento. À esquerda encontra-se representada a versão antiga e à direita a versão atual.**

Este equipamento vai ser utilizado por um fabricante de pás eólicas. No processo construtivo das mesmas utiliza-se resina para realizar a vulcanização das fibras aplicadas, a necessidade de se efetuar a desgaseificação da resina, ou seja, remover as bolhas de ar presentes na mesma tem como objetivo obter a melhor qualidade de peça no final do processo uma vez que, se este procedimento de desgaseificação não for realizado ou for efetuado de maneira incompleta, existe grande probabilidade das fibras não aderirem corretamente e começarem a descolar, o que é um grave problema pois traduz-se num risco a nível estrutural, outro fenómeno que pode acontecer é o mau acabamento superficial, superfícies porosas, em que de seguida, para tentar corrigir este defeito, é realizado o alisamento da superfície recorrendo a equipamentos de lixagem e, por fim, deposição de nova camada de resina.

A nível de processo, este equipamento, bombeia resina para o interior da câmara de desgaseificação através de uma bomba hidráulica *Scherzinger*® 551 FB-DU-MK-L63, atuada por um motor elétrico *NORD*® IE5 B35, mas antes, a resina atravessa um filtro, para evitar que possíveis impurezas presentes na resina entrem no processo e, atravessa também, um caudalímetro, que serve para dar informação ao exterior da quantidade de resina que está a entrar no processo por segundo. À saída da bomba hidráulica, o fluído sobe por tubagem rígida em aço inoxidável AISI 316, atravessa uma electroválvula *Metalwork*® NAMUR 4/2 SOL/SPR e efetua-se a transição de tubagem rígida para tubagem flexível.

Utilizou-se tubagem flexível à entrada e à saída da câmara de desgaseificação para que não afetasse tanto os resultados obtidos nas medições efetuadas pelas células de carga. Quanto ao interior da câmara de desgaseificação, devido a confidencialidade industrial não pode ser feita a descrição da mesma. A resina ao entrar no interior da câmara de desgaseificação atravessa a sua estrutura interna que

cria uma espessura fina de resina e, assim, com o auxílio de uma bomba de vácuo *Busch Vacuum®* R5 RA 0063/0100 F, efetua a desgaseificação da mesma. A bomba de vácuo cria uma depressão no interior da câmara de desgaseificação que faz com que as bolhas de ar se desprendam da superfície da resina. Estas bolhas de ar são sugadas pela bomba de vácuo, atravessando uma electroválvula *Metalwork®* NAMUR 5/2 SOL/SPR, dando entrada num depósito de segurança (que será abordado já de seguida), um filtro à entrada da bomba de vácuo e, depois, expelidas para o exterior do equipamento através da tubagem de escape, note-se que toda a tubagem (à exceção da flexível) e acessórios utilizados na construção do equipamento são em aço inoxidável AISI 316. Quanto ao depósito de segurança atrás mencionado este serve para, no caso de alguma quantidade de resina ser aspirada pela bomba de vácuo, esta entra primeiro no depósito, onde tem um sensor vibratório *Pepperl+Fuchs®* LVL-A7 que ao contactar com a resina, é atuado e interrompe o processo, evitando assim que a resina entre na bomba de vácuo e estrague o equipamento. Neste depósito existe também uma válvula de globo para efetuar a purga da resina que ali possa ser depositada.

Depois de desgaseificada a resina, esta sai da câmara de desgaseificação e é bombeada para o exterior do equipamento para ser utilizada num misturador, mas até à saída do equipamento, a resina é bombeada por uma bomba hidráulica igual à atrás mencionada, atuada por um motor *NORD®* IE5 B5, atravessa a tubagem de saída onde existe um sensor de pressão e uma electroválvula igual à que é utilizada na tubagem de entrada no desgaseificador. No caso de ocorrer um pico de pressão, este é de imediato absorvido por um acumulador hidráulico que posteriormente, retorna a resina à tubagem de saída-

Na Figura 93 pode-se observar o esquema geral da máquina, onde, as setas azuis representam o caminho que a resina percorre e as verdes representam o escape do ar presente na resina.

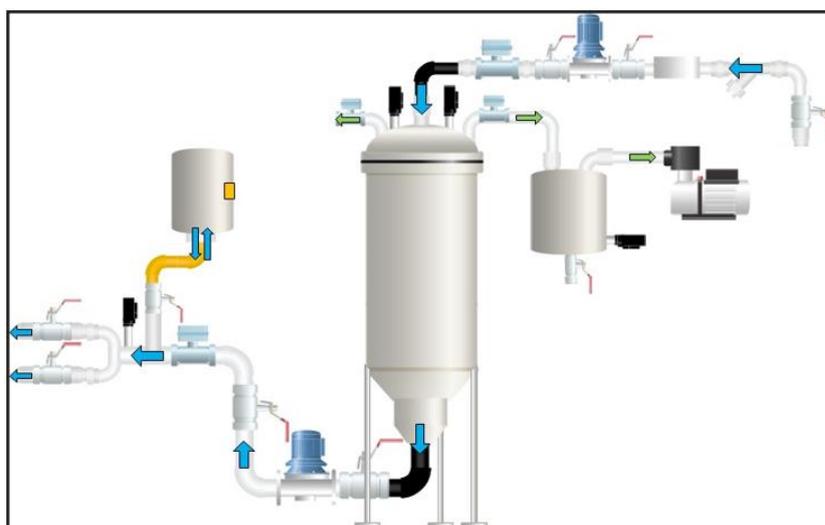


Figura 93 - Esquema geral do desgaseificador de resina.

Nas Figuras 94 pode-se observar o interior do equipamento e na Figura 96 encontra-se representado o equipamento montado na sua totalidade.



Figura 94 - Interior do equipamento (desgasificador de resina).



Figura 95 - Montagem final do desgasificador de resina.

## CAPÍTULO 5 – ESTUDO CAE (COMPUTER AIDED ENGINEERING)

### 5.1 – Introdução

Denomina-se CAE ou, Engenharia Assistida por Computador, a utilização de tecnologia por forma a simular e analisar o desempenho de projetos desenvolvidos e, efetuar melhorias ou resolver problemas de engenharia. Possibilita a análise estática e/ou dinâmica de esforços em componentes, efetuando uma análise com base no método de elementos finitos. O software utilizado no decorrer do estágio e utilizado para efetuar esta análise foi o *Solidworks*®, ferramenta computacional de elevado destaque nesta área.

FEM (“*Finite Element Method*”), também conhecido por Método dos Elementos Finitos, é um método que consiste na divisão da geometria em análise, a qual se encontra sujeita a esforços e restrições, em pequenas geometrias de forma tetraédricas, denominados elementos e, assim, representar o domínio contínuo do problema em estudo (Simões A. , 2021). A designação dada pelo software *Solidworks*® ao elemento é *SOLID* (Figura 96) e estes, encontram-se ligados entre si por pontos, denominados nós. Ao conjunto de elementos interligados entre si pelos nós, dá-se o nome de malha. Em função da divisão das geometrias, as equações matemáticas que regem o comportamento físico do modelo numérico não são resolvidas de forma exata, mas sim de forma aproximada. A precisão dos resultados obtidos é dependente do número de elementos da malha aplicada, isto é, quanto mais refinada for a malha (maior número de elementos, menor tamanho dos elementos), mais os valores obtidos se irão aproximar da aplicação real e, portanto, mais fidedignos serão os resultados. No âmbito da elaboração deste relatório, empregou-se este tipo de análise estrutural de componentes mecânicos, por meio de deslocamentos, deformações e tensões.

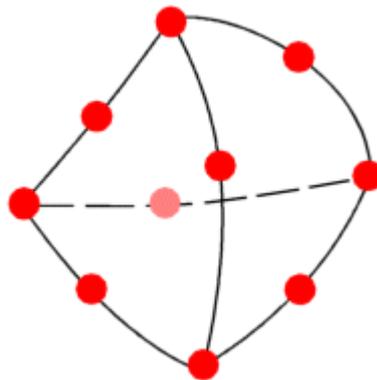


Figura 96 - Elemento SOLID. Imagem adaptada de (Systèmes, 2019).

## 5.2 – Considerações Gerais

### 5.2.1 – Garra Manipuladora para Robô

Após a elaboração do modelo 3D, efetuou-se um estudo do comportamento dos componentes que formam entre si, a garra manipuladora quando esta está a ser solicitada, com o intuito de avaliar a sua capacidade resistente, quantificar as tensões exercidas e deslocamentos ocorridos. No estudo realizado, excluiu-se da análise o rolamento, o motoredutor, os casquilhos e as ligações aparafusadas. O modelo 3D utilizado para efetuar o estudo é um modelo simplificado da geometria desenvolvida, sofrendo as seguintes alterações, remoção das roscas e os furos concêntricos passaram a ter diâmetros iguais. Este tipo de alterações ao modelo tem como objetivo reduzir o tempo de processamento do estudo, conferindo um grau idêntico de fiabilidade.

A simulação foi realizada recorrendo ao método dos elementos finitos com a ferramenta *Simulation* (ferramenta de simulação) do *Solidworks*®. Esta ferramenta traduz, normalmente, a sua eficácia quando as solicitações que se impõem estão dentro do domínio elástico dos materiais constituintes do modelo em estudo. O estudo realizado efetuou-se no domínio da estática linear, ou seja, analisou-se estaticamente o conjunto de componentes quando os mesmos se encontram sujeitos a forças, quer estas sejam distribuídas ou localizadas e às diversas restrições dadas ao modelo.

Para a realização do estudo foi necessário definir os materiais das geometrias que constituem o modelo, a intensidade, direção e sentido dos esforços a que os componentes estão sujeitos, as restrições e ligação entre componentes e a caracterização da malha. Posteriormente foi necessário efetuar-se um estudo de convergência de malha para validar os resultados obtidos e poder aferir valores aproximados dos reais em termos de tensão, deslocamento e deformação no modelo desenvolvido.

Na perspetiva de uma análise numérica por elementos finitos (FEA – *Finite Element Analysis*), as características da malha utilizada no modelo desempenham um papel fulcral na obtenção de resultados fidedignos. Para tal, o estudo de convergência de malha deve ser efetuado, fazendo ajustes ao número de elementos a considerar no modelo, assim como a sua dimensão. O estudo efetuado à convergência de malha nesta simulação numérica realizou-se com base na energia elástica de deformação, a qual se obtém a partir do deslocamento máximo.

### 5.2.2 – Propriedades Mecânicas dos Materiais

Os materiais utilizados no modelo em estudo encontram-se enumerados anteriormente no capítulo referente ao projeto da garra manipuladora e as suas propriedades mecânicas na Tabela 1.

### 5.2.3 – Restrições e Solicitações Aplicadas no Estudo

Visto não se possuir máquina computacional suficientemente potente para um estudo pormenorizado e com vista a encurtar tempos de simulação, optou-se por analisar apenas 1/3 do modelo, dividindo-o assim em 3 partes iguais (Figura 97).

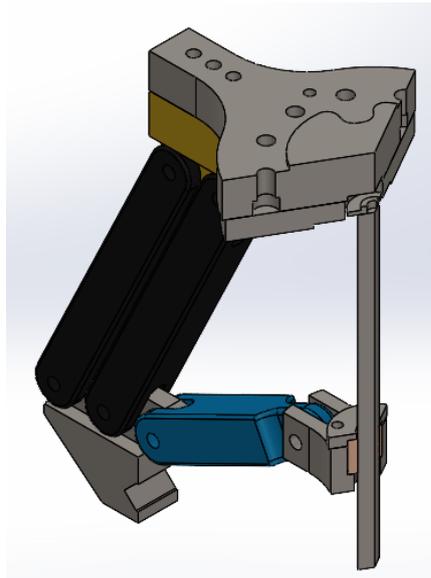


Figura 97 - Modelo utilizado no estudo.

Efetou-se a fixação do modelo pelas caixas para alojamento de parafusos DIN 912 M12 presentes na flange de acoplamento ao robô, para simular o suporte do modelo quando os parafusos o fixam ao mesmo. Para tal utilizou-se o comando *Fixed Geometry* e, assim, restringir as faces aos 3 graus de liberdade (DOF – *Degrees of Freedom*) (Figura 98). Este comando também foi utilizado para simular o assento do suporte do rolamento no motoredutor.

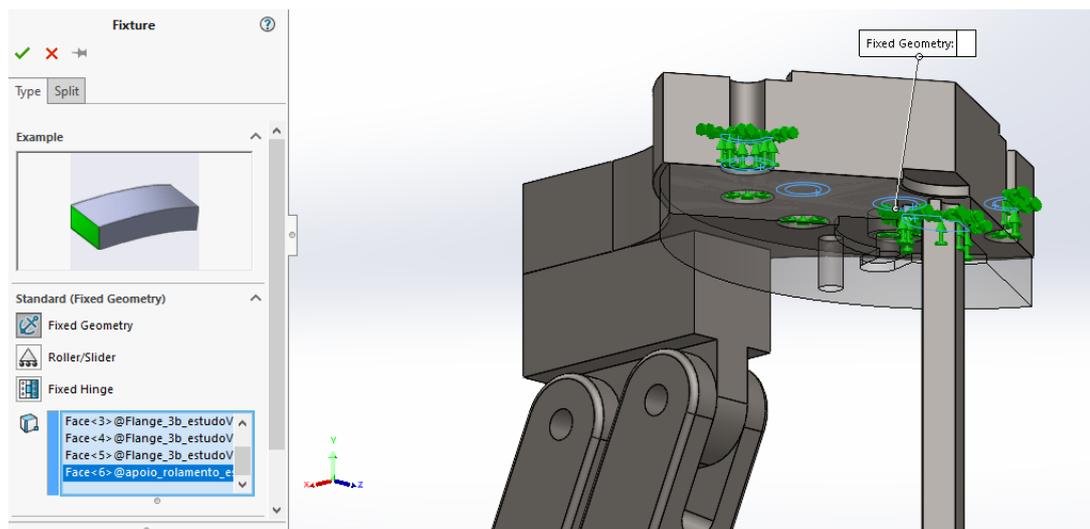


Figura 98 - Utilização do comando *Fixed Geometry* no modelo em estudo.

Como se trabalhou apenas com 1/3 do modelo, utilizou-se o comando *Cyclic Symmetry*, comando que permite analisar um modelo com padrões circulares em torno de um eixo, modelando um segmento representativo. A geometria, restrições e condições de carregamento aplicadas devem ser semelhantes para todos os outros segmentos que formam o modelo, isto é, padronizados ciclicamente. As faces na secção de corte devem ser iguais em forma e área, podendo ser não planares e uma condição para se usar este comando é que o ângulo formado pelas duas faces selecionadas para cada segmento deve ser divisível por  $360^\circ$  (Systèmes, 2019). Portanto, por forma a se utilizar este comando, foi necessário criar previamente, um eixo no centro do modelo e paralelo à orientação do parafuso sem fim (Figura 99) e, selecionar as faces da secção de cada componente do modelo e o eixo, conforme está representado na Figura 100.

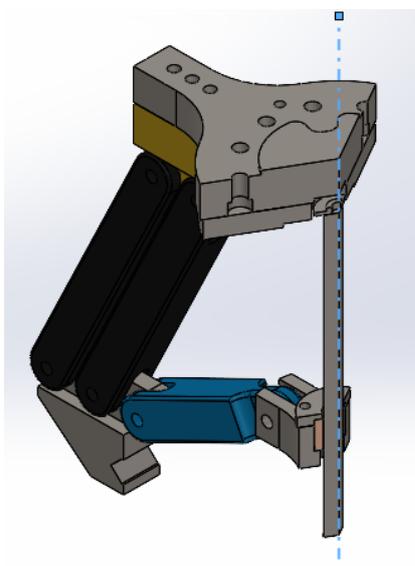


Figura 99 - Criação de um eixo no centro do modelo e paralelo à orientação do parafuso sem-fim.

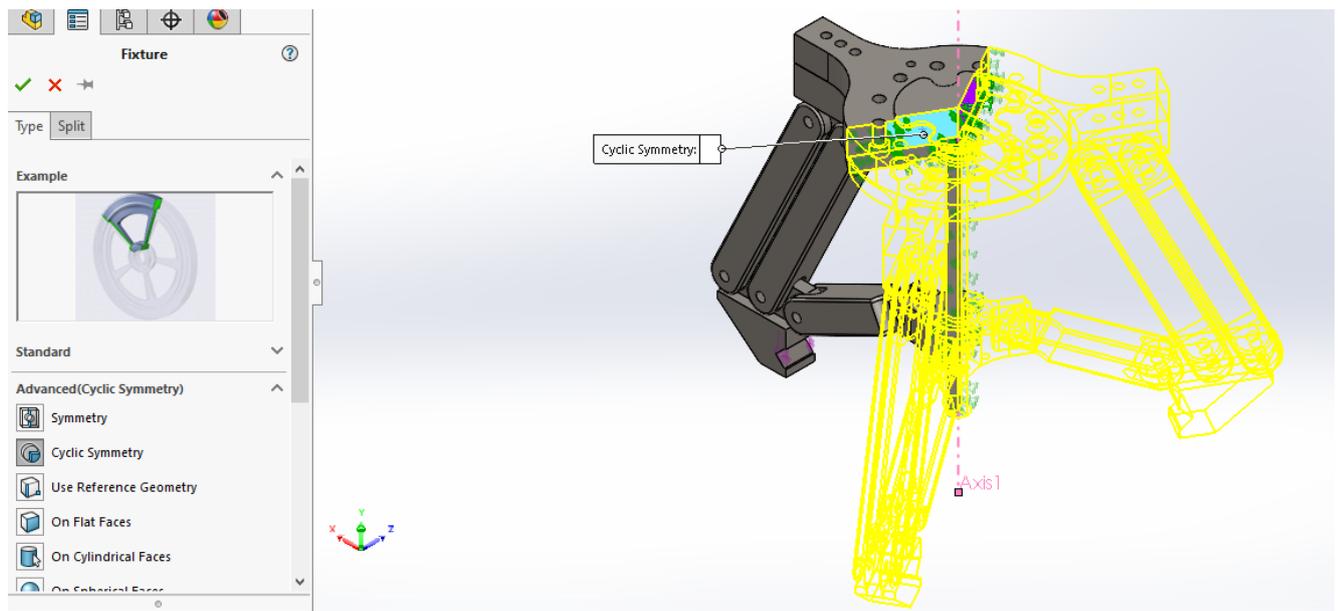


Figura 100 - Utilização do comando *Cyclic Geometry* no modelo em estudo.

A condição global de contacto entre componentes utilizada nesta simulação foi a de *No Penetration* (Figura 101), uma vez que, os componentes estão em contacto entre si, mas não existe penetramento entre eles. Foi utilizado, adicionalmente um contacto *Bonded* entre os componentes, parafuso sem-fim, porca e suporte de rolamento (Figura 102) para simular o atravancamento entre a porca e o parafuso e a fixação do suporte do rolamento ao parafuso sem-fim.

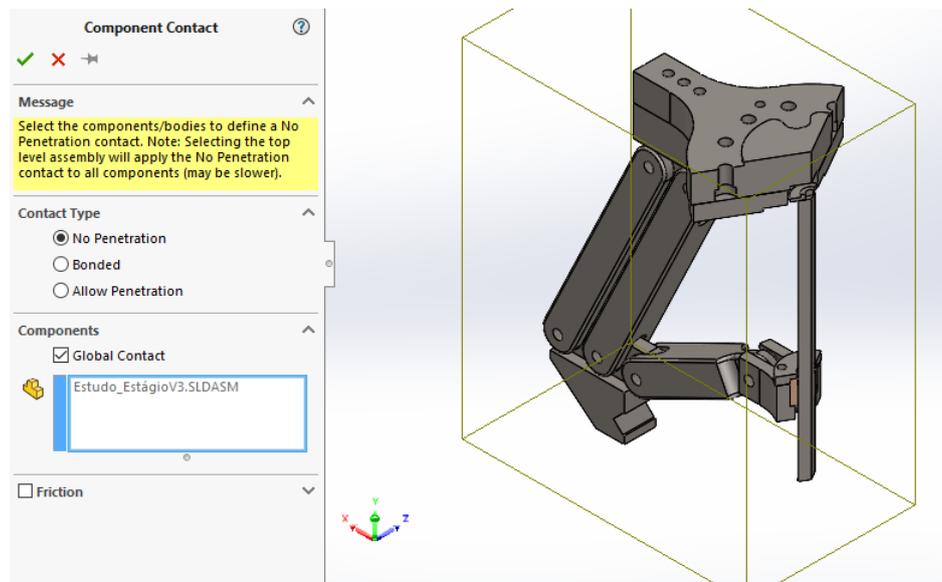


Figura 101 - Condição global utilizada no modelo em estudo.

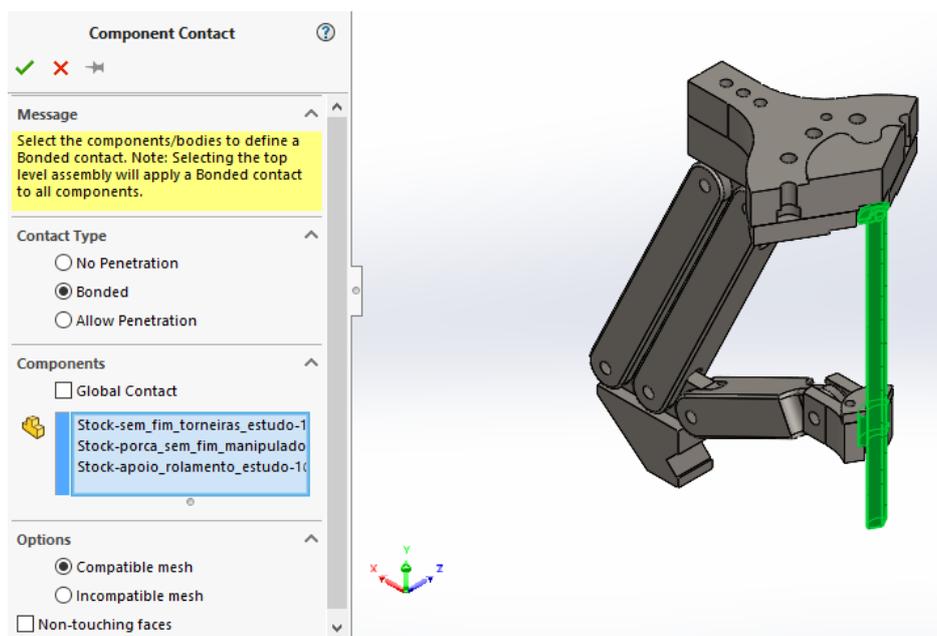


Figura 102 - Utilização de contacto *Bonded* entre os componentes, parafuso sem-fim, porca e suporte de rolamento.

Por forma a simular a funcionalidade do rolamento, apesar de ter-se excluído este componente da análise, utilizou-se o comando *Rigid Connector* entre as faces representadas na Figura 103. Este comando conecta rigidamente as faces selecionadas de um corpo sólido às faces selecionadas de um outro corpo sólido, fazendo assim com que, as faces apenas se possam deformar rigidamente como um grupo e a distância entre as faces selecionadas permaneça constante.

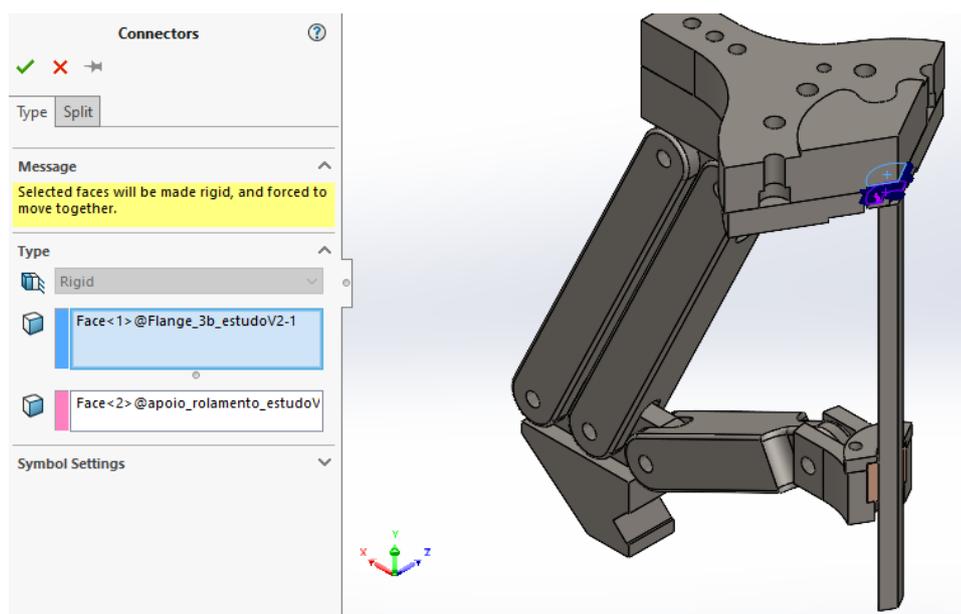
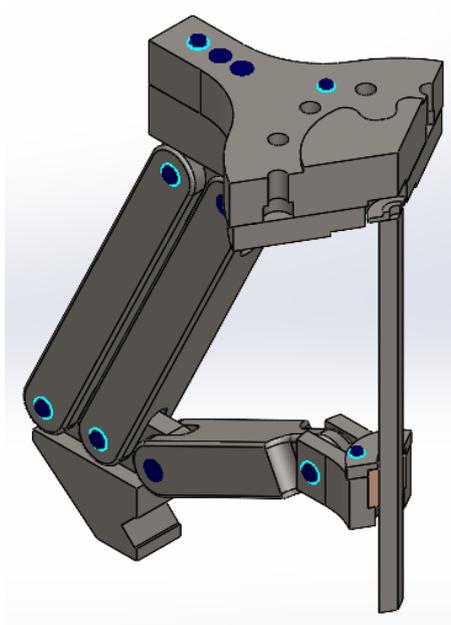


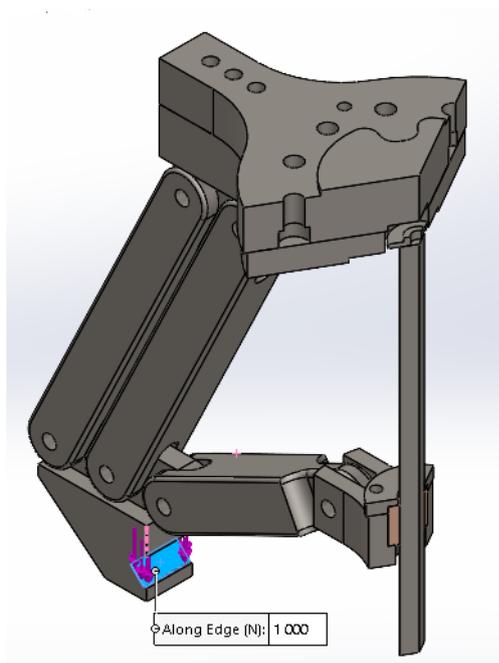
Figura 103 - Utilização do comando *Rigid Connector* no modelo em estudo.

Utilizaram-se pinos virtuais para simular as ligações aparafusadas presentes no modelo e assim simplificar a simulação do estudo. Os pinos que simulam os parafusos de fixação dos braços permitem o movimento rotacional, restringindo assim, apenas o movimento de translação. Quanto aos restantes pinos utilizados, restringem quer o movimento de translação entre componentes como o de rotação. A Figura 104 ilustra os vários pinos utilizados.



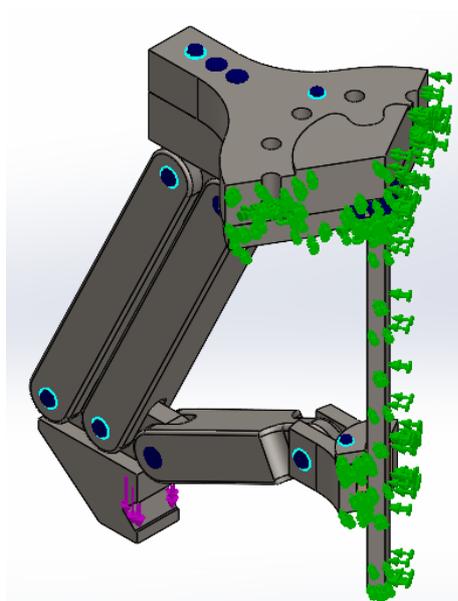
**Figura 104 - Pinos virtuais aplicados no modelo em estudo.**

Relativamente ao carregamento aplicado, como apenas se considerou 1/3 do modelo para o estudo e dadas as limitações computacionais do equipamento utilizado para efetuar este estudo, optou-se por simular um caso hipotético e extremamente desfavorável. Simulou-se a carga que a válvula de maiores dimensões faria se estivesse assente em apenas uma garra, para tal, aplicou-se uma força ( $F$ ) de 1000N na face da garra representada na Figura 105, esta força representa a massa da válvula de maiores dimensões (aproximadamente 100Kg) multiplicada pela aceleração gravítica (aprox.  $9,81 \text{ m/s}^2$ ). A ideia da simulação deste caso era, caso 1/3 do modelo suportasse o peso exercido pela válvula sem que nenhum componente ultrapassasse o domínio elástico então, o modelo completo seria capaz de suportar o peso da válvula, conferindo 3 vezes mais resistência.



**Figura 105 - Aplicação da carga na garra.**

Na Figura 106 pode-se observar o modelo com todas as restrições e solicitações aplicadas.



**Figura 106 - Modelo totalmente restringido e solicitado.**

#### 5.2.4 – Estudo de Convergência de Malha

A malha é gerada a partir da ferramenta *Create Mesh* (Figura 107) e representa a aparência do modelo após a divisão do mesmo em elementos mais pequenos. Quanto mais pequenos forem os elementos, maior a quantidade de divisões do modelo e consequentemente, maior a quantidade de cálculos a efetuar pelo *software*. Deve, portanto, definir-se o refinamento da malha em função da precisão desejada e da capacidade de processamento computacional disponível.

Para a simulação do modelo, utilizou-se uma *Curvature-Based Mesh*, uma vez que existem algumas geometrias arredondadas e este tipo de malha, compostas por elementos tetraédricos de segunda ordem, é ideal para utilizar em geometrias curvilíneas dado que, cada elemento deste tipo de malha possui 10 nós e cada um deles possui 3 graus de liberdade (Figura 108). As arestas e as faces dos elementos sólidos de segunda ordem conseguem assumir formas curvilíneas para melhor dividir modelos com geometrias curvas e/ou durante o processo de deformação quando os elementos se deformam por ação de um carregamento.

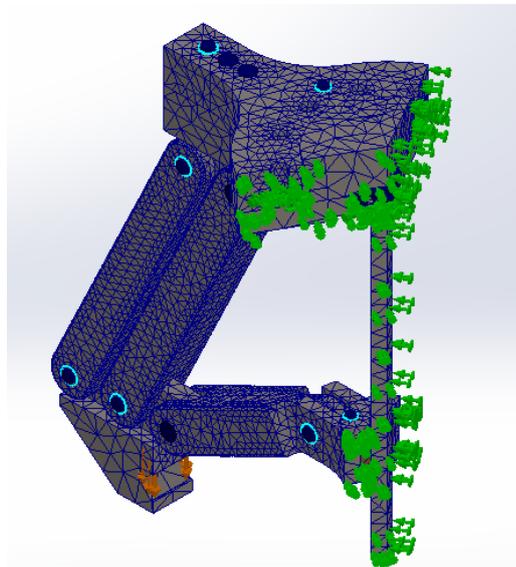


Figura 107 - Representação *Solidworks*® da distribuição de malha na peça.

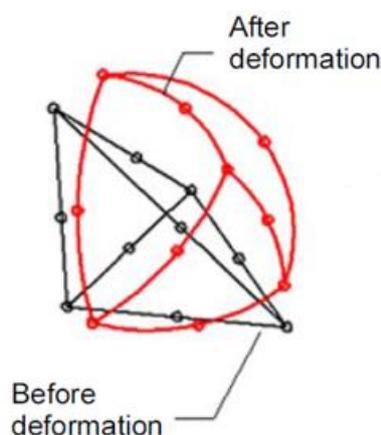


Figura 108 - Elemento tetraédrico de segunda ordem. Imagem adaptada de (Roseiro e Maranhã, 2020).

De maneira a realizar o estudo de convergência de malha, atribui-se um tamanho máximo de elemento de malha de 70mm e, progressivamente, refinou-se o mesmo de 5mm em 5mm até ao valor de 10mm.

Para avaliar a convergência da malha, elaborou-se uma tabela (Tabela 2) onde se registaram o tamanho da malha utilizada [mm], o número de elementos, o número de nós, o deslocamento máximo obtido [mm] e a tensão Von Mises máxima [MPa], tendo-se, posteriormente, gerado o gráfico de convergência de malha apresentado na Figura 109. Da análise do gráfico pode-se constatar que o mesmo convergiu a partir do 11º ponto do gráfico e, concluir que, a rigidez do modelo foi estabelecida.

Tabela 2 - Dados obtidos para os diferentes tamanhos de malha.

| Tamanho da Malha [mm] |      | Nº de Elementos | Nº de Nós | Deslocamento Máx. [mm] | Tensão Von Mises Máx. [MPa] |
|-----------------------|------|-----------------|-----------|------------------------|-----------------------------|
| Max.                  | Min. |                 |           |                        |                             |
| 70                    | 14   | 11969           | 22073     | 0,0322                 | 13,18                       |
| 65                    | 13   | 12684           | 23322     | 0,0333                 | 14,12                       |
| 60                    | 12   | 14227           | 25936     | 0,0343                 | 16,5                        |
| 55                    | 11   | 16990           | 30824     | 0,0344                 | 17,33                       |
| 50                    | 10   | 19772           | 35381     | 0,0345                 | 17,21                       |
| 45                    | 9    | 23131           | 40686     | 0,0346                 | 18,06                       |
| 40                    | 8    | 27722           | 48089     | 0,0346                 | 18,14                       |
| 35                    | 7    | 35309           | 60107     | 0,0347                 | 18,56                       |
| 30                    | 6    | 44371           | 74828     | 0,0345                 | 19,57                       |
| 25                    | 5    | 58612           | 97629     | 0,0348                 | 19,39                       |
| 20                    | 4    | 70470           | 116214    | 0,0348                 | 20,14                       |
| 15                    | 3    | 99220           | 161578    | 0,0348                 | 20,41                       |
| 10                    | 2    | 150433          | 240982    | 0,0348                 | 21,06                       |

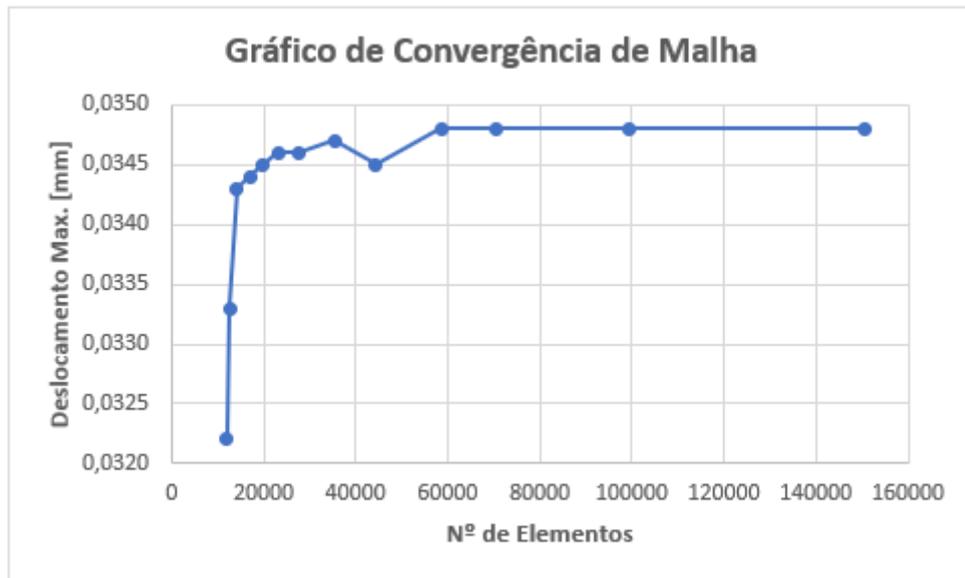


Figura 109 - Gráfico de convergência de malha do modelo em estudo.

Segundo os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que o modelo em estudo se encontra sobredimensionado, uma vez que a tensão máxima obtida nunca ultrapassa a tensão de cedência do material com menor valor desta propriedade, podendo mesmo afirmar-se que fica muito distante desse valor (120 MPa) e, também, o deslocamento máximo obtido é tão pequeno que, na utilização do modelo na vida real nem será perceptível. Portanto, modelo está validado e pode ser posto em prática na vida real com segurança.

Na Figura 110 encontram-se representadas a tensão Von Mises máxima obtida (21,06 MPa) e o deslocamento máximo obtido (0,0348 MPa) na simulação numérica do modelo, a) e b) respetivamente.

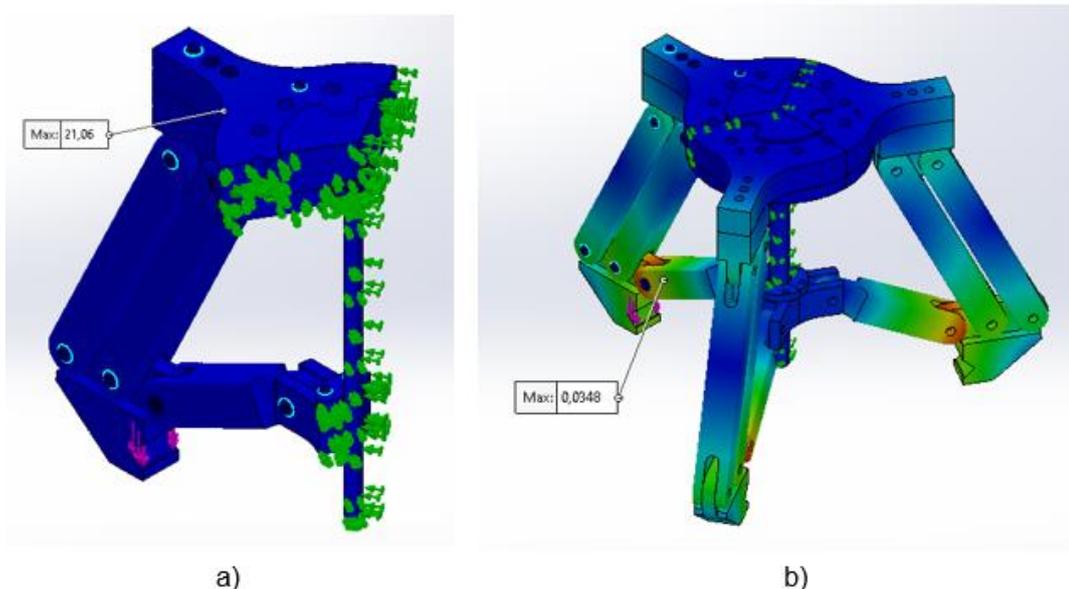


Figura 110 - a) tensão Von Mises máxima obtida; b) Deslocamento máximo obtido.

## CONCLUSÃO

Com o decorrer do tempo as empresas confrontam-se com diversas dificuldades e, tentam dar resposta para que possam manter-se na linha da frente e ter um crescimento constante no mercado onde atuam. A gestão industrial desempenha uma tarefa muito importante na criação de sistemas eficientes e flexíveis, na expectativa de atingir a melhor produtividade, satisfação dos funcionários e a atividade segura nas condições adversas que caracterizam o cenário competitivo atual. A competição entre as organizações carece da diminuição de custos operacionais de maneira que as mesmas mantenham o seu ranking no mercado, sendo que, tal, apenas é possível, com estruturas bem delineadas capazes de rentabilizar recursos, espaços, suprimindo ao máximo os desperdícios e retirando também, o melhor rendimento dos recursos humanos (Jesus, 2017).

Dito isto, reforça-se uma vez mais a ideia de que, na Matechnics, o principal objetivo é criar equipamentos inovadores, fazendo uso das tecnologias mais recentes que existem atualmente no mercado, acrescentando assim, valor ao cliente e dotando-o de melhores e maiores níveis de produtividade.

Quanto aos objetivos do estágio, que, passavam pelo desenvolvimento de alguns projetos na empresa e que, posteriormente iriam ser postos em prática nas empresas dos clientes caso a sua viabilidade se verificasse, foram, de um modo geral, atingidos. Acabou por se atingir o objetivo do desenvolvimento da flange de ligação entre um motor e uma bomba hidráulica, do dispositivo elevatório de tampa de reservatório cilíndrico e bomba hidráulica, da garra manipuladora para robô, da elaboração de maquete 3D e, do desgasificador de resina, tendo-se também participado em outros projetos que não foram mencionados neste relatório por se considerarem de menor interesse.

Relativamente ao dispositivo elevatório de tampa de reservatório cilíndrico e bomba hidráulica verificou-se que, o objetivo de diminuir o tempo despendido na substituição do reservatório vazio por um cheio e acoplamento da tampa no mesmo e bomba hidráulica foi atingido pois, agora, trata-se de um processo mais automatizado e que reduziu consideravelmente o tempo investido nesse processo.

A garra manipuladora também foi uma solução criada que melhorou, em muito, a cadência de alimentação de válvulas na linha de pintura e que, eliminou a necessidade de mão de obra humana neste processo, podendo esta ser aplicada noutro setor em carência.

Quanto à maquete 3D, este foi um projeto, apesar de simples, desafiante, pois, realizou-se a par dos outros projetos desenvolvidos no estágio e, assim, ajudou no desenvolvimento da capacidade de rentabilização de tempo e organização de prioridades no trabalho.

O último projeto desenvolvido no estágio foi o desgasificador de resina e, apenas foi possível a sua realização graças ao apoio dos colaboradores da Matechnics uma vez que, dado a data de término do período de estágio, teve de ser realizado em contra-relógio.

No decorrer do estágio, além dos projetos mencionados, houve a possibilidade de inserção noutros projetos igualmente desafiantes e nos quais foi possível aprender muito. Concluo que, com este estágio, melhorei em muito a minha destreza em modelação 3D, aprendi a aplicar de forma mais precisa e autónoma ajustamentos e tolerâncias em peças, pude lidar com tecnologias atuais e inovadoras, aprendi a fazer manuais de instruções de equipamentos desenvolvidos, pude pôr em prática os meus conhecimentos em análise por elementos finitos e validar geometrias desenvolvidas e, por fim, mas não menos importante, crescer como pessoa, aprender a trabalhar em equipa e lidar com prazos de entrega de projetos.

Pode-se mencionar, como desenvolvimentos futuros, a realização de um estudo topológico nas geometrias que constituem a garra manipuladora para robô para a obtenção de geometrias mais leves e com igual rigidez e desempenho faces às solicitações a que este dispositivo se encontra sujeito. A topologia é uma ciência matemática que faz referência direta à geometria, estudando tipos e propriedades de superfícies ou espaços recorrendo à análise das deformações, torções e alongamento de objetos (AmbScience, s.d.). Outro desenvolvimento futuro que também se pode mencionar é a reestruturação da estrutura interna da câmara de desgaseificação do desgasificador de resina e sua fixação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (2022). *new.abb.com*. Obtido de <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6700>
- Abimota. (Outubro de 2021). Abimota Newsletter. *MATECHNICS - Master Technology Solutions, Lda*.
- AmbScience. (s.d.). *AmbScience Engenharia*. Obtido de [ambscience.com](https://ambscience.com/topologia-o-que-e-e-aplicacoes/):  
<https://ambscience.com/topologia-o-que-e-e-aplicacoes/>
- Completo, A., Festas, A., & Davim, J. P. (2009). *Tecnologia de Fabrico*. Publindústria.
- Ferretti, E. A. (2016). Prototipagem Rápida. *Processo de Desenvolvimento de Produtos*. Universidade Federal de Itajubá.
- Jesus, N. (2017). *Programação da Produção: Otimização de Layouts Industriais*. Porto: Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto .
- Matechnics. (2022b). Obtido de <https://www.instagram.com/p/CZeyypKsu9Y/>
- Matechnics. (2022a). *Matecnic*. Obtido de [www.matecnic.pt](http://www.matecnic.pt):  
<https://www.matecnic.pt/0/pt/company/>
- Morais, S. (2012). *Desenho Técnico Básico 3*. Porto Editora.
- Nord. (2022). *Nord Drivesystems*. Obtido de <https://www.nord.com/pt/produtos/motoredutores/motoredutores-de-rosca-sem-fim/redutor-sem-fim-helicoidal-universal-si.jsp>
- Relvas, C. (2002). *Controlo Numérico Computorizado, Conceitos Fundamentais*. Publindústria, Edições Técnicas.
- Roseiro, L., & Maranhã, V. (2020). Apoio TEÓRICO. *Introdução*. Apontamentos da Unidade Curricular de Cálculo Automático de Sistemas Mecânicos, ISEC.
- Simões, A. (2021). *Projeto de Equipamentos Auxiliares de Fabrico*. Coimbra: Relatório de Estágio Curricular para Obtenção de Grau Mestre, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Simões, F., & Ferreira, P. (2018a). Apontamentos - Parte Laboratorial (Convencional). *Ferramentas e Parâmetros de corte - Apresentação*. Apontamentos da Unidade Curricular de Processos de Maquinagem.
- Simões, F., & Ferreira, P. (2018b). Apontamentos - Parte Teórica. 2 - *Processos Tecnológicos de Corte por Arranque de Aparas*. Apontamentos da Unidade Curricular de Processos de Maquinagem.
- SKF. (2022). *skf.com*. Obtido de <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51204>
- Systèmes, Dassault. (2019). *Solidworks Web Help*. Obtido de [help.solidworks.com](https://help.solidworks.com):  
[https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c\\_Circular\\_Symmetry.htm](https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_Circular_Symmetry.htm)