



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos
Mecânicos

Autor

João Pedro Rodrigues Gonçalves

Orientador

Prof. Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão

Co-Orientador

Prof. Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, março de 2026

AGRADECIMENTOS

Ao longo do percurso no Mestrado em Engenharia Mecânica, contei com o apoio de diferentes pessoas e entidades, às quais desejo expressar os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família por acreditar nas minhas capacidades e pelo apoio constante que me deram ao longo de todo o percurso académico, em especial durante a fase mais exigente de redação deste relatório.

À empresa Vista Alegre Atlantis, deixo um profundo agradecimento pela oportunidade concedida para a realização deste projeto em contexto industrial, bem como pela disponibilidade, abertura e compreensão demonstradas ao longo de todo o seu desenvolvimento. A possibilidade de aplicar e aprofundar conhecimentos num ambiente real de produção foi determinante para o meu enriquecimento técnico e profissional.

Aos diversos colaboradores da empresa que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste projeto, agradeço toda a ajuda prestada, a partilha de conhecimentos, a disponibilidade demonstrada e o apoio técnico. A colaboração e o espírito de ajuda revelaram-se essenciais para ultrapassar os desafios.

Por último, mas não menos relevante, expresso o meu sincero agradecimento ao Professor Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão, na qualidade de orientador, pelo acompanhamento, pela orientação científica, pelas sugestões construtivas e pela disponibilidade demonstrada ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço igualmente ao Professor Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira, na qualidade de coorientador, pelo apoio, contributos técnicos e acompanhamento prestados, que foram fundamentais para a qualidade final deste relatório.

RESUMO

No âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, foi desenvolvido um projeto na empresa Vista Alegre Atlantis. Esta empresa integra o grupo Vista Alegre e dedica-se ao fabrico de peças em vidro e cristal, produzidas de forma manual e automática.

Este projeto surgiu da necessidade de automatizar o processo de lixagem de garrafas de cristal, com peso aproximado de 7 kg, que se torna fisicamente exigente e repetitivo quando realizado manualmente, especialmente em grandes quantidades. Assim, foi proposto o desenvolvimento de uma garra para acoplar a um robô, capaz de manusear estas garrafas e executar, de forma automatizada, o processo de lixagem.

O projeto envolveu o estudo e o dimensionamento de uma garra robótica adaptada às características geométricas e materiais das garrafas, considerando critérios como a segurança na preensão, a resistência estrutural, a facilidade de montagem e manutenção e a compatibilidade com o sistema de controlo do robô.

Desta forma, o presente relatório descreve todas as etapas do projeto, desde o estudo e conceção da garra robótica, passando pela sua otimização e produção, até à programação do robô para a realização das tarefas pretendidas. O objetivo final consistiu em melhorar as condições ergonómicas dos operadores, aumentar a produtividade e a qualidade e ainda assegurar maior repetibilidade no processo.

Palavras-Chave: garra robótica; automatização; robô; lixagem

ABSTRACT

Within the scope of the Master's Degree in Mechanical Engineering, in the specialisation area of Construction and Maintenance of Mechanical Equipment, at the Institute of Engineering of Coimbra, a project was developed at the company Vista Alegre Atlantis. This company is part of the Vista Alegre group and is dedicated to the manufacture of glass and crystal products, produced through both manual and automated processes.

This project arose from the need to automate the grinding of crystal bottles, weighing approximately 7 kg, which becomes physically demanding and repetitive when performed manually, particularly in large quantities. Accordingly, a robotic gripper development, for mounting on a robot, was proposed, capable of handling those bottles and performing the grinding process in an automated manner.

The project involved the study and design of a robotic gripper adapted to the geometric and material characteristics of the bottles, and considering criteria such as gripping safety, structural strength, ease of assembly and maintenance, and compatibility with the robot control system.

Thus, this report describes all stages of the project, from the study and design of the robotic gripper, through its optimisation and manufacturing, to the programming of the robot to perform the intended tasks. The final objective was to improve operators' ergonomic conditions, increase productivity and quality, and ensure greater process repeatability.

Keywords: robotic gripper; automation; robot; grinding.

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Abreviaturas.....	x
1 Introdução	1
2 Enquadramento teórico	4
2.1 Processo de fabrico de garrafas de cristal.....	4
2.1.1 Fusão do vidro.....	4
2.2 Técnicas manuais de inspeção e lixagem.....	6
2.2.1 Inspeção visual manual.....	6
2.2.2 Lixagem manual de defeitos superficiais	6
2.3 Tipos de garras robóticas.....	7
2.3.1 Garras pneumáticas.....	7
2.3.2 Garras hidráulicas	8
2.3.3 Garras por vácuo	9
2.3.4 Garras com acionamento elétrico	9
3 Definição do problema e objetivos	11
4 Equipamentos utilizados.....	14
4.1 Robô.....	14
4.2 Lixadora vertical	16
4.3 Fresadora CNC.....	17
5 Conceção e desenvolvimento da garra robótica	20
5.1 Requisitos funcionais	20
5.2 Requisitos construtivos.....	21
5.3 Seleção do tipo de garra robótica	22
5.4 Seleção do cilindro pneumático.....	22
5.4.1 Cálculo da força de atuação do cilindro pneumático.....	24
5.5 Circuito pneumático.....	25
5.6 Modelação 3D.....	28

5.6.1	Base de apoio	28
5.6.2	Corpo principal.....	31
5.6.3	Base superior.....	33
6	Otimização topológica do corpo metálico da base superior	36
6.1	Análise pelo método de elementos finito do corpo metálico da base superior	37
6.1.1	Resultados obtidos para a geometria original da peça	39
6.1.2	Resultados obtidos para a geometria modificada da peça	40
7	Maquinação dos componentes.....	45
7.1	Planeamento e programação CNC.....	45
7.2	Estratégias e processos de maquinagem.....	46
7.3	Desafios e adaptações durante a maquinagem	48
8	disposição e programação do robô.....	50
8.1	Disposição do robô.....	50
8.2	Estrutura do ciclo de lixagem da garrafa	51
9	Conclusões.....	57
9.1	Resultados dos testes efetuados.....	57
9.2	Considerações finais.....	60
9.3	Sugestão de trabalhos futuros	62
	Referências Bibliográficas.....	64
	Anexos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Processo manual de fabricação de uma peça em cristal.	1
Figura 2.1 - Representação da garrafa objeto de estudo para o desenvolvimento da garra robótica (Dutch Expat Shop, s.d.).....	4
Figura 2.2 - Garra pneumática de 3 pinças da Festo (Festo, s.d.).	7
Figura 2.3 - Garra hidráulica (MobileHydraulicTips, 2013).	8
Figura 2.4 - Garra por vácuo (Epick, 2022).	9
Figura 2.5 - Garra com acionamento elétrico (Universal Robots, 2020).....	10
Figura 3.1 - Processo de lixagem manual de garrafas de cristal e vidro.....	11
Figura 4.1 – Robô: a) vista geral; b) placa de identificação	14
Figura 4.2 - Identificação das zonas de trabalho (ABB Robotics, 2025).....	16
Figura 4.3 - Lixadora vertical.	16
Figura 4.4 - Fresadora CNC.....	18
Figura 4.5 - Unidade de controlo da fresadora CNC.....	19
Figura 5.1 - Exemplo de teste realizado com cilindro pneumático.....	23
Figura 5.2 - Cilindro pneumático selecionado	24
Figura 5.3 - Esquema do circuito pneumático utilizado.....	26
Figura 5.4 - Válvula direcional manual 5/2 (RS Components, s.d.).....	27
Figura 5.5 - Válvulas reguladoras de caudal unidirecionais utilizadas	27
Figura 5.6 - Base de apoio modelada no <i>software</i> Autodesk Inventor 2025®.....	29
Figura 5.7 - Base de apoio real.....	29
Figura 5.8 - Vista explodida da base de apoio modelada no <i>software</i> Autodesk Inventor 2025®.	30
Figura 5.9 - Montagem do corpo principal com a base inferior.....	31
Figura 5.10 - Suportes do cilindro pneumático: a) superior; b) inferior.	32
Figura 5.11 - Vista explodida da base superior.	34
Figura 6.1 - Geometria malhada do corpo metálico da base superior e seleção da opção <i>Curved Mesh Elements</i>	37
Figura 6.2 - Zonas de encastramento assinaladas a vermelho.	38
Figura 6.3 - Zona de aplicação da carga ascendente.	38

Figura 6.4 - Resultados das simulações da peça original.....	39
Figura 6.5 - Zona de tensão máxima na peça original.	40
Figura 6.6 - Corpo metálico da base superior após as primeiras alterações.....	41
Figura 6.7 - Análise das tensões por elementos finitos da primeira iteração.	42
Figura 6.8 - Localização do ponto crítico.	42
Figura 6.9 - Aumento de 1,5 mm nas faces assinaladas.....	43
Figura 6.10 - Resultados das simulações para a geometria modificada da peça.	43
Figura 6.11 - Gráfico da Convergência do Deslocamento.....	44
Figura 7.1 - Folha de suporte para cálculo das velocidades de corte.	46
Figura 7.2 - Utilização da fresa de ponta esférica.	47
Figura 7.3 - Maquinação do corpo superior pelo quinto eixo da fresadora CNC... 48	
Figura 7.4 – Comparação do acabamento superficial de a) peça submetida a vibração e b) peça maquinada de forma estável (MFG Robots, 2025).....	49
Figura 7.5 - Rasgos (assinalados pela seta) efetuados no material com geometria cilíndrica.....	49
Figura 8.1 - Disposição do robô: a) zona de carregamento; b) lixa vertical 1; c) lixa vertical 2.....	50
Figura 8.2 - Fluxograma do procedimento de lixagem da garrafa.....	52
Figura 8.3 - Dispositivo <i>FlexPendant</i>	53
Figura 8.4 - Excerto de código referente à definição da ferramenta do robô (<i>tooldata</i>).	54
Figura 8.5 - Excerto de código com a definição do ponto intermédio <i>pseg</i>	55
Figura 8.6 - Código de implementação do ajuste progressivo por meio de alteração do referencial da ferramenta.....	56
Figura 9.1 - Comparação das taxas de aproveitamento entre os processos a) automatizado e b) manual.....	57
Figura 9.2 - Resultados de lixagem obtidos nos testes.....	58
Figura 9.3 - Pormenor de garrafa que cumpre os padrões de qualidade.	58
Figura 9.4 - Comparação dos tempos de lixagem de 800 garrafas entre os processos automatizado e manual.	59
Figura 9.5 - Garra robótica manuseando uma garrafa.	61
Figura 9.6 - Câmara Zivid One+ (Zivid, 2025).....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Alcance nas respectivas zonas de trabalho.	15
Tabela 6.2 - Propriedades do alumínio 7175 T73 (Autodesk, 2025).....	36

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

F - força teórica, Newton [N];

P - pressão de trabalho, Pascal [Pa]

A - área, metro quadrado [m²]

D – diâmetro, metro [m]

r - raio, metro [m]

η - rendimento

3D - tridimensional

CNC - Computer Numerical Control

1 INTRODUÇÃO

A indústria do vidro e do cristal, especialmente no segmento de produção manual, é um setor tradicional que preserva técnicas artesanais ao longo das décadas. Na Europa, a produção manual de vidro é limitada, com poucas fábricas dedicadas a este processo artesanal. Este cenário traduz-se numa escassa modernização e evolução dos métodos de fabrico, exigindo um elevado esforço físico e destreza dos operadores.

Preservando esta tradição, a empresa portuguesa Vista Alegre Atlantis, integrada no grupo Vista Alegre, dedica-se ao fabrico manual de peças em vidro e cristal de elevada qualidade. A unidade industrial de Alcobaça, relevante para o presente projeto, dedica-se à produção manual de cristal e vidro, mantendo os procedimentos, técnicas e conhecimentos que caracterizam a marca há várias décadas. As peças são produzidas através de operações de fusão, sopro, moldagem e acabamento. Nesta fábrica, a produção de uma determinada peça, visível na Figura 1.1, assenta em técnicas artesanais que exigem elevada precisão dos operadores, garantindo a qualidade estética e dimensional das peças.



Figura 1.1 - Processo manual de fabricação de uma peça em cristal.

Entre os produtos fabricados, destaca-se uma garrafa de cristal, com peso aproximado de 7 kg, cujo processo de acabamento por lixagem, destinado a eliminar falhas superficiais causadas durante a conformação, é realizado manualmente, sendo

fisicamente exigente e repetitivo, especialmente quando executado em grandes quantidades.

Nos últimos anos, a Vista Alegre Atlantis tem apostado na modernização das suas operações, procurando reforçar a eficiência, a estabilidade produtiva e a ergonomia, sem comprometer o caráter distintivo dos seus produtos. Esta visão integra de forma natural a introdução de soluções tecnológicas que apoiem etapas exigentes ou repetitivas da produção. É neste enquadramento institucional, marcado pela valorização da qualidade, pela preservação da tradição e pela abertura à inovação, que surge a necessidade de desenvolver uma solução automatizada para apoio ao acabamento das garrafas de cristal, alinhada com a estratégia de melhoria contínua da empresa.

Assim, este projeto surgiu da necessidade de automatizar o processo de acabamento destas garrafas, visando melhorar as condições ergonómicas dos operadores e aumentar a produtividade. Para tal, foi proposto o desenvolvimento de um sistema automatizado de lixagem com uma garra robótica acoplada a um robô IRB 2600-20/1.65 usada para manusear as garrafas de forma segura e eficaz, permitindo uma execução autónoma e automatizada do processo de lixagem.

O presente relatório descreve todas as etapas do projeto, desde o estudo e conceção do equipamento, passando pela sua otimização e produção, até à programação do robô para a realização das tarefas pretendidas. O objetivo final consistiu em integrar soluções de automação num processo tradicionalmente manual, contribuindo para a modernização da produção e para a melhoria das condições de trabalho na indústria vidreira artesanal.

Após esta introdução, o presente relatório encontra-se estruturado em seis capítulos, nos quais se descrevem as diferentes fases do trabalho desenvolvido, desde o enquadramento teórico até à análise dos resultados e às conclusões finais.

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

O Capítulo 2 apresenta o enquadramento teórico do projeto, abordando o processo de fabrico de garrafas de cristal, as técnicas manuais de inspeção e lixagem e os diferentes tipos de garras robóticas utilizados em sistemas automatizados.

O Capítulo 3 introduz o problema, os objetivos do projeto e os principais desafios associados à automatização do processo de lixagem.

O Capítulo 4 refere-se aos equipamentos utilizados, nomeadamente o robô industrial, a lixadora vertical e a fresadora CNC usados na produção dos componentes da garra robótica.

O Capítulo 5 relata a conceção e o desenvolvimento da garra robótica, incluindo os requisitos funcionais e construtivos, o dimensionamento dos componentes, a modelação tridimensional, a otimização estrutural e o processo de fabrico.

O Capítulo 6 menciona a otimização da geometria de um dos componentes do sistema mediante análise estrutural por elementos finitos

O Capítulo 7 descreve a maquinagem, dos componentes que integram o sistema, recorrendo a uma fresadora CNC.

O Capítulo 8 explica a programação e configuração do robô para manipular a garrafa. Neste capítulo, serão apresentados a disposição da célula robotizada, incluindo medidas de segurança, a estrutura do ciclo de lixagem, os princípios de programação adotados e a definição da ferramenta.

Por fim, no Capítulo 9 são apresentados os resultados obtidos com a implementação da solução desenvolvida, bem como sua análise crítica. São ainda expostas as conclusões finais do trabalho e apresentadas sugestões para trabalhos futuros e possíveis evoluções da solução proposta.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Processo de fabrico de garrafas de cristal

A produção de uma garrafa de cristal de elevada qualidade envolve um processo complexo e rigoroso, que visa garantir não só a integridade estrutural da peça, mas também um elevado padrão estético.

Embora envolva diversas operações interdependentes, este processo pode ser, de forma simplificada, dividido em quatro fases principais: fusão do vidro, moldagem, recozimento e acabamento. Cada uma destas etapas desempenha um papel fundamental na obtenção de um produto final que cumpra os requisitos de resistência, precisão dimensional e apresentação visual exigidos para garrafas premium, como é o caso da garrafa em questão, visível na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Representação da garrafa objeto de estudo para o desenvolvimento da garra robótica (Dutch Expat Shop, s.d.).

2.1.1 Fusão do vidro

O cristal é um tipo de vidro, pertencente à mesma família dos materiais vítreos, que apresenta uma composição química modificada, incorporando óxidos metálicos, como o óxido de chumbo, embora atualmente sejam mais utilizados óxidos de bário ou de potássio. Ambos os materiais possuem temperaturas de fusão elevadas, entre

1350 °C e 1600 °C, etapa que inicia o processo de fabrico de uma garrafa (European Commission, 2012; Mysen & Frantz, 1994; Levin & Ugrinic, 1953).

Após a fusão, a mistura fundida é recolhida na extremidade de uma cana metálica e moldada. Dependendo do tamanho da peça, o sopro pode ser feito manualmente ou com o auxílio de ar comprimido para o interior de um molde metálico com o formato desejado da garrafa (Rawson, 2002).

A peça moldada é posteriormente transferida para um forno de arrefecimento gradual, onde ocorre o recozimento, processo destinado a aliviar as tensões internas resultantes do arrefecimento desigual.

A fase final do fabrico inclui o acabamento da garrafa, que, dependendo do nível de detalhe e sofisticação, pode envolver corte, lapidação, polimento e gravação.

Devido à natureza artesanal do processo, é comum a ocorrência de pequenas imperfeições, algumas das quais podem comprometer a integridade estética ou estrutural da peça, sendo muitas delas irreversíveis. Entre os defeitos mais frequentemente observados, destacam-se:

- Inclusões gasosas (bolhas de ar) que resultam da retenção de gases no interior do vidro durante a fusão ou o sopro;
- Linhas de moldagem (costuras): marcas superficiais ocasionadas pelas juntas do molde metálico,
- Riscos e microfissuras: durante o manuseio, o arrefecimento ou o transporte;
- Deformações dimensionais: pequenas variações na espessura ou na geometria da garrafa,
- Tensões internas residuais: podem provocar fraturas espontâneas ou durante o uso.

2.2 Técnicas manuais de inspeção e lixagem

2.2.1 Inspeção visual manual

A inspeção das garrafas de cristal é, atualmente, um processo essencialmente manual, realizado por operadores experientes que avaliam visualmente cada peça. Esta análise efetua-se sob diferentes condições de iluminação – direta, difusa e transmitida – de modo a permitir a identificação de defeitos superficiais e internos, como bolhas de ar, riscos, inclusões ou pequenas deformações.

Durante esta fase, o operador roda a garrafa de forma controlada, observando-a em vários ângulos e aproveitando o brilho e a transparência do cristal para detetar imperfeições. Em alguns casos, são utilizados suportes giratórios ou mesas de inspeção iluminadas, mas a deteção de defeitos continua a depender fortemente da experiência, da destreza e da sensibilidade visual do operador.

Apesar da eficácia na identificação de anomalias, este método apresenta limitações evidentes: a subjetividade da avaliação, a fadiga visual e postural após longos períodos de trabalho e a dificuldade em garantir uniformidade e repetibilidade nos critérios de aceitação.

2.2.2 Lixagem manual de defeitos superficiais

Quando são detetadas imperfeições ligeiras, como riscos, pequenas irregularidades ou rugosidades, procede-se à lixagem manual da garrafa. Este processo tem como objetivo eliminar defeitos superficiais sem comprometer a transparência ou a forma da peça.

A lixagem é realizada com o auxílio de abrasivos de grão fino, normalmente à base de carbureto de silício, podendo ser aplicada a seco ou com água para reduzir o aquecimento e minimizar o risco de danos. O operador segura a garrafa com as mãos ou recorre a um suporte de apoio, enquanto movimenta o abrasivo de forma controlada, aplicando uma pressão ligeira e uniforme.

Em alguns casos, após a lixagem, realiza-se um polimento complementar com discos de feltro e pastas abrasivas específicas, com o intuito de restituir o brilho e a uniformidade da superfície.

Dado o peso (aproximadamente 7 kg) e a fragilidade da garrafa, esta operação requer elevada concentração e controlo. O operador deve assegurar que o esforço aplicado é suficiente para corrigir eventuais defeitos, sem provocar fissuras ou fraturas. Tal exige experiência e precisão manual.

2.3 Tipos de garras robóticas

As garras robóticas são elementos fundamentais em sistemas automatizados de manipulação, permitindo a interação física entre o robô e o objeto a ser manipulado. A sua conceção depende fortemente das características do objeto, do tipo de tarefa e das condições operacionais envolvidas. De forma geral, as garras podem ser classificadas segundo o princípio de prensão, o modo de atuação e a natureza do contacto com a peça.

2.3.1 Garras pneumáticas

Uma garra pneumática, visível na Figura 2.2, converte a pressão do ar comprimido em movimento linear ou angular (Jiang & Smith, 2012) por meio de um atuador pneumático, permitindo a abertura e o fecho das garras. Este tipo de sistema utiliza válvulas e cilindros pneumáticos para controlar o caudal de ar e o movimento do atuador.



Figura 2.2 - Garra pneumática de 3 pinças da Festo (Festo, s.d.).

As garras pneumáticas apresentam uma elevada relação entre força e peso, além de um custo relativamente baixo, sendo amplamente utilizadas em ambientes industriais. Uma das principais vantagens deste sistema é a independência entre a força e a velocidade, que podem ser ajustadas de forma autónoma e controlada.

2.3.2 Garras hidráulicas

O funcionamento de uma garra hidráulica, visível na Figura 2.3, baseia-se num princípio semelhante ao de uma garra pneumática, sendo o ar comprimido substituído por um fluido hidráulico incompressível, geralmente óleo. Este tipo de sistema permite criar forças de aperto significativamente superiores, sendo adequado para aplicações que exigem elevada potência e robustez estrutural.

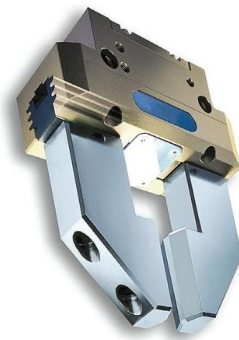


Figura 2.3 - Garra hidráulica (MobileHydraulicTips, 2013).

Em comparação com sistemas pneumáticos, as garras hidráulicas podem atingir pressões entre 135 e 275 bar, fornecendo forças até 25 vezes superiores às de um cilindro pneumático de dimensões equivalentes (Brosed et al., 2012).

Contudo, a inerente complexidade do sistema hidráulico, devido à necessidade de bombas hidráulicas, reservatórios para armazenar o fluido transmissor de energia e manutenção mais exigente, limita a sua aplicação em ambientes industriais onde a precisão e a limpeza são prioritárias.

Assim, este tipo de garras é mais comum em ambientes industriais pesados, como metalomecânicas ou fundições, onde a capacidade de carga é determinante.

2.3.3 Garras por vácuo

Uma garra por vácuo, visível na Figura 2.4, utiliza ventosas para criar uma depressão entre a garra e a superfície do objeto a ser agarrado. Essa diferença de pressão gera uma força de aderência que mantém o objeto fixo durante o movimento (Dollar & Howe, 2006).

Esta metodologia é particularmente eficaz em superfícies planas, lisas e não porosas, sendo amplamente aplicada em sistemas de embalagem, eletrônica e transporte automatizado de peças. As suas principais vantagens incluem a simplicidade de concepção, a rapidez de atuação e a ausência de contacto mecânico direto, o que reduz o risco de danos na superfície do objeto.

No entanto, a eficácia deste tipo de garras depende da estanquidade e da qualidade da superfície, sendo pouco adequado para materiais irregulares, texturados ou frágeis, como o cristal artesanal.



Figura 2.4 - Garra por vácuo (Epick, 2022).

2.3.4 Garras com acionamento elétrico

Uma garra elétrica, semelhante à visível na Figura 2.5, recorre a motores elétricos, fusos, cremalheiras ou engrenagens para transformar movimento rotativo em movimento linear, permitindo o controlo direto da posição e da força de aperto (Gonzalez, 2015).

Este tipo de garra oferece elevada precisão e repetibilidade, além da possibilidade de monitorização contínua por meio de sensores integrados. A principal vantagem é o

controlo digital do movimento, que permite ajustes finos e automatizados, ideais para aplicações que exigem manipulação delicada.



Figura 2.5 - Garra com acionamento elétrico (Universal Robots, 2020).

Por outro lado, as garras elétricas tendem a ser mais caras e mais complexas, do ponto de vista eletrónico, além de apresentarem menor capacidade de força quando comparadas às hidráulicas ou pneumáticas (Gonzalez, 2015). Apesar disso, são amplamente utilizadas em processos de montagem de precisão e em robôs colaborativos, em que a segurança e a interação com o operador humano são essenciais.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

O processo de lixagem manual das garrafas de cristal, visível na Figura 3.1, apresenta limitações significativas que comprometem a ergonomia, a produtividade e a repetibilidade do trabalho.



Figura 3.1 - Processo de lixagem manual de garrafas de cristal e vidro.

O peso da garrafa (aproximadamente 7 kg) exige um esforço físico elevado no seu manuseamento pelos operadores, o que, aliado à necessidade de manter posições fixas, posturas inadequadas e movimentos repetitivos, aumenta o risco de fadiga, desconforto e lesões músculo-esqueléticas, especialmente nos membros superiores e na região lombar (Kumar & Singh, 2021). Além disso, ao longo do tempo, o contacto prolongado com água e abrasivos pode causar desconforto e desgaste físico.

Em termos de produtividade, o processo é demorado e de baixa cadência, pois cada peça é trabalhada manualmente.

A variedade de operadores também gera diferenças na qualidade, comprometendo a repetibilidade e a eficiência global do processo. Estas limitações tornam-se particularmente críticas quando é necessário processar grandes quantidades de garrafas, dificultando a manutenção de um nível constante de qualidade e aumentando o risco de erros humanos ou de danos.

Além disso, a natureza artesanal das peças introduz variabilidade no acabamento, tornando difícil obter um resultado uniforme e consistente, especialmente em grandes quantidades de produção

De forma a melhorar as condições ergonómicas dos operadores, aumentar a produtividade e repetibilidade, surgiu a oportunidade de automatizar o processo de acabamento destas garrafas. Foi proposto o desenvolvimento de um sistema automatizado de lixagem, acoplando uma garra robótica a um robô IRB 2600-20/1.65, de modo a manusear as garrafas de forma segura e eficaz, contribuindo para a execução autónoma e automatizada do processo de lixagem.

O principal desafio técnico na automatização do processo reside na manipulação segura das garrafas, frágeis e de geometria irregular, com superfícies curvas e polidas. Qualquer excesso de força pode provocar fissuras ou fraturas, enquanto uma prensão insuficiente compromete a fixação durante o movimento do robô ou o contacto com a lixa. Assim, a necessidade de desenvolver uma garra robótica surge não só para proteger a integridade das peças, mas também para melhorar as condições de trabalho e aumentar a produtividade.

Durante a fase de conceção, foram estudadas várias alternativas:

- Inicialmente, considerou-se a prensão pelo gargalo da garrafa, solução descartada devido à fragilidade estrutural;
- Avaliou-se também o uso de ventosas ou sistemas híbridos, mas a superfície polida e irregular do cristal compromete a aderência, tornando o método instável;
- A solução escolhida consistiu na prensão vertical pela base e pelo gargalo da garrafa, permitindo uma distribuição uniforme do peso, maior estabilidade e segurança durante os movimentos do robô.

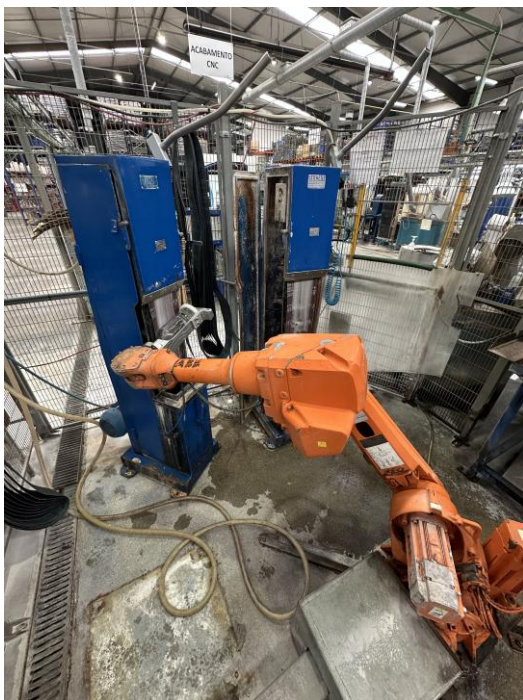
Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

A garra final foi projetada para distribuir a força de aperto de forma homogênea, evitando danos na peça e permitindo movimentos seguros do robô, incluindo rotações e aproximações à lixadora. Ao ser acoplada diretamente ao robô, garante estabilidade durante o processo, assegurando a integridade das garrafas, melhorando significativamente as condições ergonômicas e aumentando a produtividade da linha de produção.

4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.1 Robô

A garra robótica desenvolvida no âmbito deste projeto de mestrado foi projetada especificamente para ser integrada no robô modelo IRB 2600–20/1.65, apresentado na Figura 4.1, que será responsável por executar totalmente o processo de lixagem das garrafas.



a)



b)

Figura 4.1 – Robô: a) vista geral; b) placa de identificação

Este robô apresenta um peso ou carga total de 280 kg e uma capacidade de carga útil de 20 kg, tornando-o adequado à manipulação de objetos com dimensões e pesos moderados, como as garrafas em questão. Trata-se de um equipamento altamente eficiente, com alcance máximo de 1,65 m, o que lhe permite operar de forma flexível em diferentes posições e alcançar pontos de trabalho que exigem precisão e repetibilidade. Além disso, a sua robustez e fiabilidade tornam-no uma ferramenta

ideal para processos industriais automatizados que requerem consistência e segurança.

Importa salientar que o robô em questão é um manipulador industrial. Isto significa que não foi concebido para operar em colaboração com seres humanos, uma vez que não dispõe de sensores de força e de binário integrados que permitam, de forma segura, a deteção e a limitação de colisões. Além disso, este robô é capaz de executar movimentos rápidos e de elevada potência, o que pode representar um risco significativo de lesão em caso de contacto com um operador.

O robô encontra-se instalado no interior de uma célula de segurança, de modo a garantir a separação física entre a zona de trabalho do robô e os operadores. A célula de segurança está equipada com barreiras metálicas, uma barreira ótica na zona de carregamento de garrafas no robô e uma porta com fechos de segurança, que impedem o acesso durante o funcionamento automático. Caso alguma porta seja aberta, o sistema de segurança interrompe imediatamente os movimentos do robô. Adicionalmente, a célula de segurança dispõe de botões de paragem de emergência estrategicamente posicionados, permitindo a interrupção imediata.

Convém também referir que a escolha deste robô não decorreu de uma opção puramente tecnológica, mas sim da sua disponibilidade na empresa, sendo este equipamento já utilizado noutras tarefas. Embora não estivesse alocado a tempo inteiro a este processo, a sua utilização permitiu aproveitar os recursos existentes de forma prática e económica, ajustando o desenvolvimento da garra robótica às condições disponíveis.

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.2 estão apresentados os alcances do robô nas respetivas zonas de trabalho (ABB Robotics, 2025). Estes valores permitem caracterizar o espaço de operação deste equipamento e são essenciais para compreender a capacidade do robô de atingir diferentes posições dentro da sua área de trabalho.

Tabela 4.1 - Alcance nas respetivas zonas de trabalho.

Modelo	Posição	Posição	Posição	Posição	Posição	Posição
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

	A	B	C	D	E	F
IRB 2600 – 20/1.65	1948	933	837	469	1353	1653
	mm	mm	mm	mm	mm	mm

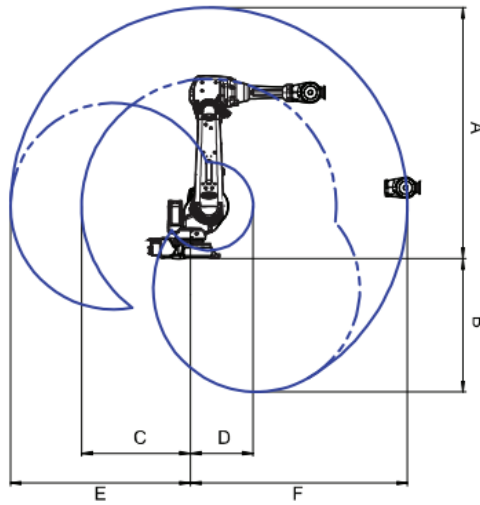


Figura 4.2 - Identificação das zonas de trabalho (ABB Robotics, 2025).

4.2 Lixadora vertical

O equipamento responsável por realizar o processo de lixagem das garrafas, com o objetivo de eliminar os defeitos resultantes de um fecho incorreto do molde (já descritos em capítulos anteriores), é a lixadora vertical, visível na Figura 10.



Figura 4.3 - Lixadora vertical.

Este equipamento é amplamente utilizado na empresa para este tipo de aplicação, tendo sido escolhido não apenas pela sua adequação ao processo, mas também pela sua disponibilidade para uso durante o desenvolvimento do projeto.

A lixadora vertical utiliza uma fita de lixa (identificada com o número 1 na Figura 4.3) que se movimenta continuamente no sentido vertical descendente, permitindo um desgaste controlado e uniforme da superfície da garrafa. O tipo de lixa e o grão do abrasivo podem ser facilmente alterados através da substituição da fita. Com base na experiência dos colaboradores da empresa, foi utilizada uma lixa com grão 400, considerada a mais adequada para este tipo de operação.

A seleção deste grão define não só a eficiência do processo, como a qualidade do acabamento: um grão mais grosso deixaria marcas profundas (difíceis de eliminar posteriormente) na superfície da garrafa, enquanto um grão mais fino se tornaria rapidamente ineficaz, perdendo o seu poder abrasivo após algumas utilizações. Desta forma, o grão 400 revelou-se a opção mais equilibrada, capaz de garantir um bom acabamento e uma durabilidade adequada da fita de lixa.

4.3 Fresadora CNC

A fresadora CNC, modelo MORI ULTRASONIC 50, visível na Figura 4.4, foi fundamental para este projeto, permitindo a maquinação precisa de todos os componentes da garra robótica. A sua utilização garantiu compatibilidade geométrica entre as peças e respeito pelas tolerâncias definidas.



Figura 4.4 - Fresadora CNC.

Trata-se de uma máquina de cinco eixos, equipada com atuadores piezoelétricos que geram vibrações ultrassónicas na ferramenta de corte. Esta tecnologia reduz o esforço de corte, melhora a evacuação de material e prolonga a vida útil das ferramentas. Torna-se especialmente útil na maquinagem de materiais frágeis, duros ou de difícil maquinagem, como vidro e cristal.

A fresadora CNC dispõe de fuso de alta rotação e controlo contínuo dos cinco eixos, permitindo a execução de geometrias complexas com elevada precisão posicional. A unidade de controlo da fresadora CNC, visível na Figura 4.5, facilita o ajuste e a gestão dos parâmetros de corte, assegurando estabilidade durante operações críticas e a rápida adaptação a diferentes componentes.



Figura 4.5 - Unidade de controlo da fresadora CNC.

O recurso a esta fresadora assegurou um processo de fabrico robusto, previsível e com elevada qualidade dimensional, contribuindo decisivamente para o sucesso do projeto.

5 CONCEÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA GARRA ROBÓTICA

Após a definição das ideias iniciais e do enquadramento geral do projeto, estabeleceram-se os requisitos funcionais e construtivos que orientaram o processo de conceção da garra robótica. Estes requisitos garantem que a ferramenta desenvolvida cumpre os objetivos de operação, segurança e integração com o robô em questão, assegurando simultaneamente a qualidade e a repetibilidade do processo de lixagem das garrafas.

5.1 Requisitos funcionais

Os requisitos funcionais definem o comportamento esperado da garra robótica durante o processo de manipulação e lixagem das garrafas, assegurando que o sistema atende aos objetivos de precisão, fiabilidade e segurança ao longo de todo o ciclo de trabalho. Esses requisitos abrangem o desempenho operacional da garra, desde o contacto com a garrafa até à sua libertação, após a conclusão do processo de lixagem.

- **Capacidade de prensão:** A garra robótica deve ser capaz de segurar firmemente as garrafas, sem causar danos superficiais. Estas garrafas são de cristal, com um peso aproximado de 7 kg e diâmetro máximo de cerca de 90 mm;
- **Precisão e repetibilidade:** O sistema deve permitir o posicionamento consistente das garrafas, garantindo uma repetibilidade mínima de $\pm 0,05$ mm, compatível com o desempenho do robô IRB 2600–20/1.65 (ABB Robotics, 2015);
- **Compatibilidade com o processo de lixagem:** A garra deve resistir às vibrações e ao pó gerado, mantendo a estabilidade da prensão;

- **Segurança operacional:** O sistema deve evitar quedas de garrafas, mesmo em caso de falha da pressão pneumática ou erro de controle;
- **Tempo de ciclo reduzido:** A garra deve permitir ciclos rápidos de agarrar–lixa–libertar, sem comprometer a integridade das garrafas.

5.2 Requisitos construtivos

Os requisitos construtivos definem os parâmetros físicos e técnicos fundamentais que orientaram o desenvolvimento da garra robótica, assegurando a sua resistência mecânica, precisão dimensional e compatibilidade com o robô IRB 2600-20/1.65. Estes requisitos traduzem-se nas seguintes considerações de projeto:

- **Peso reduzido:** O conjunto (garra + suporte + cilindro pneumático) deve pesar menos de 20 kg para não ultrapassar a carga útil nominal do robô (ABB Robotics, 2015);
- **Materiais disponíveis:** A garra deve ser fabricada com materiais disponíveis na empresa, nomeadamente alumínio 7175 T73, aço St37, aço inoxidável AISI 316 e polímero da família das poliamidas sintéticas - comercialmente designado por nylon (ASM International, 2008);
- **Facilidade de montagem e manutenção:** O sistema deve ser modular, permitindo substituição rápida de componentes;
- **Interface mecânica compatível:** A flange da garra robótica deve respeitar as normas ISO 9409-1:2004 para acoplamento a robôs industriais (International Organization for Standardization, 2004);
- **Alimentação pneumática compatível:** O circuito pneumático deve operar entre 0 bar e 6 bar, respeitando as especificações típicas de sistemas industriais (SMC Corporation, 2023);

- **Superfícies de contacto revestidas:** As garras devem incluir revestimentos de borracha de silicone ou poliuretano, com o objetivo de evitar escorregamento e proteger a superfície das garrafas de vidro;
- **Compatibilidade com o ambiente de trabalho:** Os materiais selecionados devem suportar o contacto com poeiras abrasivas provenientes do processo de lixagem.

5.3 Seleção do tipo de garra robótica

A escolha do tipo de garra robótica foi orientada pelas condições de trabalho e pelos recursos disponíveis na fábrica.

Optou-se por uma garra pneumática porque há fornecimento de ar comprimido disponível na célula de segurança e pretende-se desenvolver um equipamento 100% mecânico, evitando o contacto de componentes elétricos com água. As garras pneumáticas apresentam elevada fiabilidade, baixo custo e tempos de resposta rápidos, sendo amplamente utilizadas em ambientes industriais (SMC Corporation, 2023; Groover, 2015). Por outro lado, as garras elétricas exigem sistemas de controlo mais complexos e componentes eletrónicos sensíveis à humidade, e as garras por vácuo não seriam adequadas devido à superfície irregular e porosa das garrafas após o processo de lixagem (Mohd et al., 2018).

Deste modo, a garra pneumática revelou-se a solução mais simples, segura e eficaz para o manuseamento das garrafas de cristal.

5.4 Seleção do cilindro pneumático

Para o presente projeto, foi selecionado um cilindro pneumático de duplo efeito com amortecimento nos fins de curso, modelo CQMA40-90, com diâmetro do êmbolo de 40 mm e curso de 90 mm, operando com pressão máxima de 6 bar.

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

A escolha deste componente resultou de testes experimentais, realizados com o apoio de colaboradores da empresa onde o projeto foi desenvolvido, recorrendo a diferentes cilindros pneumáticos disponíveis na fábrica. Os testes permitiram avaliar a força de aperto e o atrito entre os componentes e a garrafa.

Concluiu-se que um cilindro pneumático de duplo efeito com êmbolo de 30 mm de diâmetro oferecia um excelente compromisso entre força e controlo. Para garantir uma margem de segurança adequada, optou-se por um modelo ligeiramente sobredimensionado. No que diz respeito ao curso do cilindro pneumático, por meio da modelação tridimensional desenvolvida até à seleção, foi possível definir um curso de 90 mm. Este curso foi estabelecido para permitir a colocação e a remoção da garrafa da garra.

A Figura 5.1 mostra um dos testes realizados com cilindros pneumáticos de diferentes dimensões, para comparar o desempenho e a força de aperto obtida.

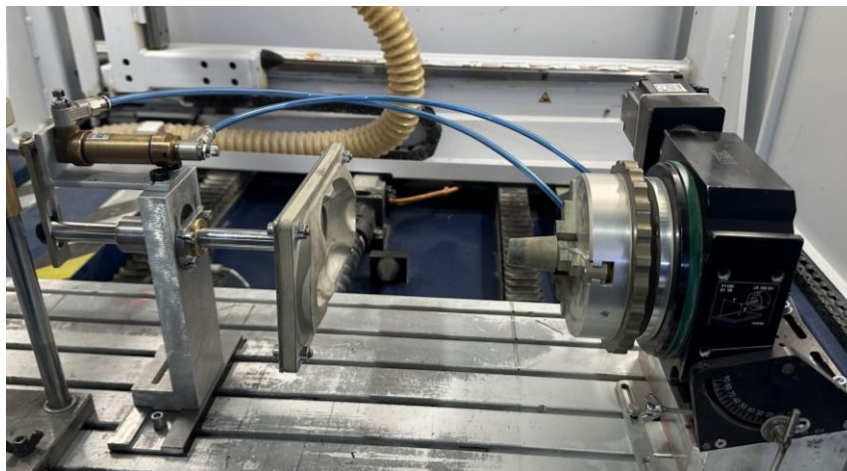


Figura 5.1 - Exemplo de teste realizado com cilindro pneumático.

O cilindro pneumático selecionado (Figura 5.2) apresenta um equilíbrio adequado entre força disponível, dimensões compactas e robustez construtiva, mostrando-se adequado às exigências funcionais da garra robótica. Um aspeto relevante é a presença de guias lineares, cuja função é evitar a rotação da parte superior da garra robótica a fixar diretamente ao topo do cilindro, assegurando um movimento linear e paralelo de todo o conjunto. Esta configuração contribui para um sistema mais

preciso, estável e fiável, minimizando desalinhamentos e esforços indesejados durante o funcionamento.

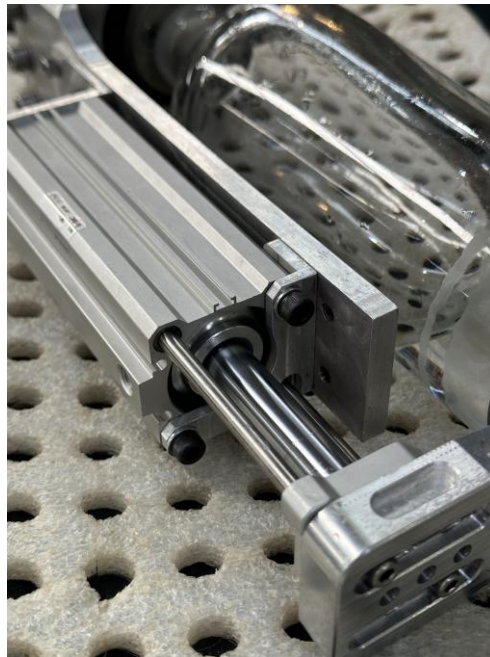


Figura 5.2 - Cilindro pneumático selecionado

5.4.1 Cálculo da força de atuação do cilindro pneumático

Para o dimensionamento da garra robótica, é fundamental determinar a força de atuação disponível no cilindro pneumático.

A força teórica exercida por um cilindro de simples efeito durante o curso de avanço da sua haste, sendo calculada pela expressão (1):

$$F = P \times A \quad (1)$$

A área do êmbolo calcula-se pela expressão (2):

$$A = \pi \times r^2 \quad (2)$$

$$A = \pi \times 0,02^2 = 0,001257 \text{ m}^2$$

Aplicando a expressão (1):

$$F = 600\,000 \times 0,001257 = 754,2\,N$$

Assim, a força teórica durante o avanço da haste do cilindro pneumático é de aproximadamente 754 N.

Após o cálculo da força teórica no avanço, é imperativo calcular a força útil, ou seja, a disponível para a aplicação, visto que as perdas por atrito nas vedações e no guiamento da haste reduzem a força teórica. Para que o dimensionamento seja realista, aplica-se um fator de eficiência η , tipicamente entre 0,8 e 0,9 para cilindros pneumáticos (Esposito, 2003). Adotando um valor conservador de 0,85, obtém-se a força útil esperada:

$$F_{\text{útil}} = F \times \eta \quad (3)$$

$$F_{\text{útil}} = 754,2 \times 0,85 = 641,1\,N$$

Conclui-se que, para o dimensionamento da garra robótica e de seus componentes, deve-se considerar uma força útil de atuação de 641,1 N.

5.5 Circuito pneumático

O circuito pneumático responsável por acionar o cilindro pneumático da garra robótica apresenta uma configuração simples, funcional e perfeitamente ajustada às necessidades da garra robótica. Tal como representado na Figura 5.3, o ar comprimido chega ao robô a partir da rede industrial da fábrica, que inclui, a montante, todos os elementos de preparação necessários, nomeadamente o filtro, o regulador de pressão, o lubrificador e o depósito intermédio. Estes componentes garantem que o ar comprimido, devidamente filtrado, regulado e com pressão constante, abastece o circuito pneumático da garra. Por esse motivo, o circuito pneumático específico deste projeto inicia-se apenas após o depósito intermédio, a partir do qual se encontram os componentes pneumáticos necessários ao funcionamento da garra robótica.

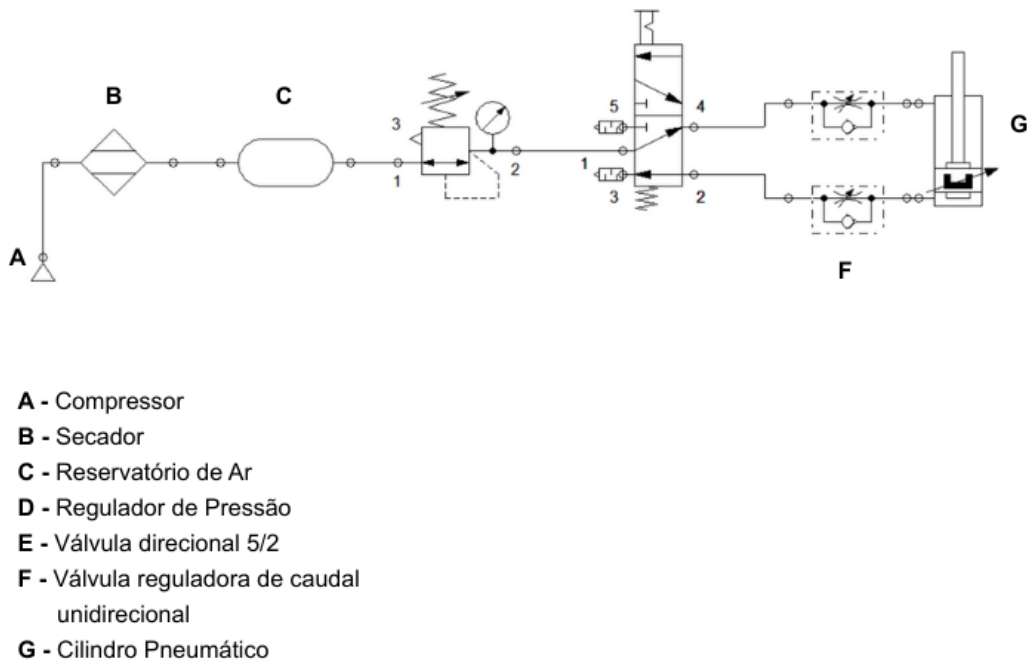


Figura 5.3 - Esquema do circuito pneumático utilizado.

O primeiro componente incorporado no circuito pneumático da garra robótica é o regulador de pressão (D), responsável por ajustar e estabilizar a pressão de trabalho do circuito, influenciando diretamente a força de apreensão exercida pela garra. O manómetro integrado permite a monitorização contínua da pressão, facilitando a calibração do sistema e contribuindo para a deteção rápida de eventuais desvios ou anomalias de funcionamento.

A jusante encontra-se uma válvula direcional manual 5/2 (ver Figura 5.4) com retorno por mola (E), responsável pelo comando do atuador pneumático. Esta válvula recebe o ar pelo orifício de alimentação e, mediante comutação, alterna a alimentação entre as duas saídas de utilização, direcionando o ar comprimido para a câmara de avanço ou para a câmara de recuo do cilindro. A posição central (retorno por mola) assegura o restabelecimento da posição de repouso sempre que a atuação deixa de ser exercida, garantindo a segurança e previsibilidade no comportamento do sistema.



Figura 5.4 - Válvula direcional manual 5/2 (RS Components, s.d.)

Como se vê na Figura 5.5, as válvulas reguladoras de caudal unidirecionais (F) são instaladas nas linhas que ligam a válvula direcional ao cilindro pneumático, uma em cada linha. Estas válvulas permitem ajustar, independentemente, o caudal que entra em cada câmara do cilindro, controlando as velocidades de avanço e de recuo da haste. Por serem unidirecionais, permitem o fluxo livre no sentido oposto, garantindo reações corretas durante a mudança de sentido e facilitando um controlo suave dos movimentos sem impactos.

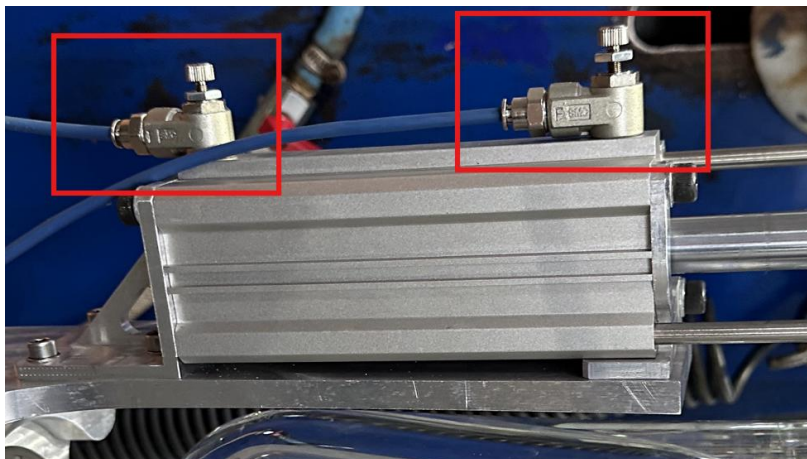


Figura 5.5 - Válvulas reguladoras de caudal unidirecionais utilizadas

O elemento final do circuito é o cilindro pneumático de duplo efeito (G), que converte a energia pneumática em movimento linear da haste. O cilindro recebe ar

comprimido alternadamente, em cada uma de suas câmaras, conforme a comutação da válvula direcional, proporcionando avanço e recuo controlados. O cilindro inclui os elementos de orientação necessários (guias ou casquilhos) para assegurar a precisão e repetibilidade do movimento, essenciais para a operação da garra robótica.

De forma global, o circuito pneumático caracteriza-se pela simplicidade e eficiência, integrando apenas os componentes estritamente necessários ao controlo da garra robótica, enquanto a preparação e o tratamento do ar comprimido são assegurados pela infraestrutura da fábrica, o que permite uma operação estável e consistente, sem necessidade de elementos adicionais.

5.6 Modelação 3D

Toda a modelação 3D foi realizada no software Autodesk Inventor 2025 ®, com o qual há maior familiaridade. Este ambiente de modelação permitiu a definição precisa de todos os componentes do sistema, possibilitando a análise detalhada da geometria e a implementação eficiente de alterações com impacto na massa e nas propriedades mecânicas do conjunto. A utilização deste software facilitou igualmente a elaboração dos desenhos técnicos e a execução de simulações preliminares do comportamento estrutural das peças, contribuindo para a fundamentação das decisões tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

5.6.1 Base de apoio

A modelação iniciou-se pela conceção da base de apoio rotativa, esquematizada na Figura 5.6 e Figura 5.7, desenvolvida para incorporar um rolamento que permitisse a rotação controlada da garrafa durante o processo de lixagem. Esta peça constituiu o ponto de partida do projeto, pois, além de garantir a rotação necessária, foi dimensionada para se encaixar diretamente na flange do robô, assegurando o posicionamento correto e a estabilidade do conjunto. A sua geometria foi projetada para garantir o alinhamento axial preciso, rigidez estrutural e movimentos suaves.

Estes são fatores essenciais para a uniformidade e repetibilidade do processo de lixagem, conforme descrito nos capítulos anteriores.

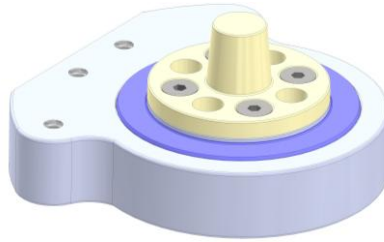


Figura 5.6 - Base de apoio modelada no *software* Autodesk Inventor 2025®.



Figura 5.7 - Base de apoio real.

Tal como é possível observar na Figura 5.8, a base rotativa é composta por um conjunto de componentes cuidadosamente modelados para que garantam o correto funcionamento do sistema. Entre estes elementos destacam-se a base inferior (7), responsável por suportar toda a estrutura da base, o rolamento (20), que permite a rotação suave da garrafa, e as peças de ligação e fixação, que asseguram a estabilidade axial e a união entre as diferentes partes. Incluem-se ainda um retentor (21), cuja função é evitar a entrada de partículas de vidro na zona do rolamento, e um freio de segurança (18), que impede a desmontagem do conjunto provocada pelos ciclos e vibrações durante a operação, garantindo a integridade do mecanismo. Com a presença do freio, a peça 2 não consegue subir e sair do rolamento, prevenindo falhas durante a operação.

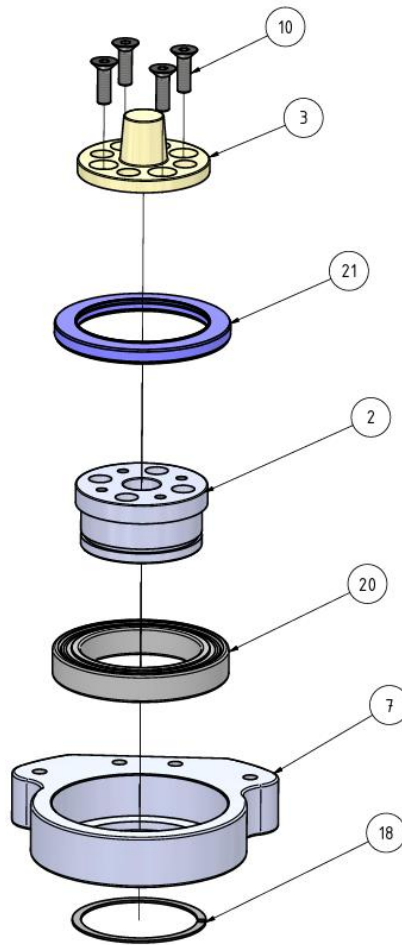


Figura 5.8 - Vista explodida da base de apoio modelada no *software* Autodesk Inventor 2025®.

2) Peça inferior para aperto ao robô; 3) Base polimérica para gargalo; 7) Base inferior; 10) DIN 7991-M6x20; 18) ISO 464-55; 20) 61911-2RS1; 21) Retentor 60-80-7

Tanto a peça 2 como a peça 7, assinaladas na Figura 5.8, mereceram cuidados redobrados durante o projeto e fabrico, visto que entram em contacto direto com o rolamento. Por este motivo, as tolerâncias dimensionais foram definidas com rigor, de forma a assegurar um encaixe preciso e um aperto correto no rolamento.

Para a peça 7, a zona destinada à montagem do rolamento foi dimensionada com um ajuste de menos duas centésimas de milímetro relativamente ao diâmetro nominal do rolamento. Este valor foi escolhido de forma a garantir uma folga muito reduzida, mas ainda suficiente para permitir a inserção controlada do rolamento sem provocar esforços excessivos durante a montagem, assegurando que não ocorrem deslocamentos ou vibrações indesejadas durante a utilização.

No caso da peça 2, foi adotado um ajuste compreendido entre mais zero e mais duas milésimas de milímetro. Este intervalo proporciona uma tolerância ligeiramente positiva, facilitando o posicionamento dos componentes que nela se apoiam e permitindo uma montagem precisa do conjunto, sem provocar interferências que dificultem o processo ou comprometam o alinhamento final.

5.6.2 Corpo principal

O corpo principal, esquematizado na Figura 5.9, tem como função absorver a maioria dos esforços gerados durante o funcionamento da garra robótica. É também o componente ao qual o cilindro pneumático está acoplado, logo deve possuir uma resistência mecânica adequada para garantir a integridade do conjunto.

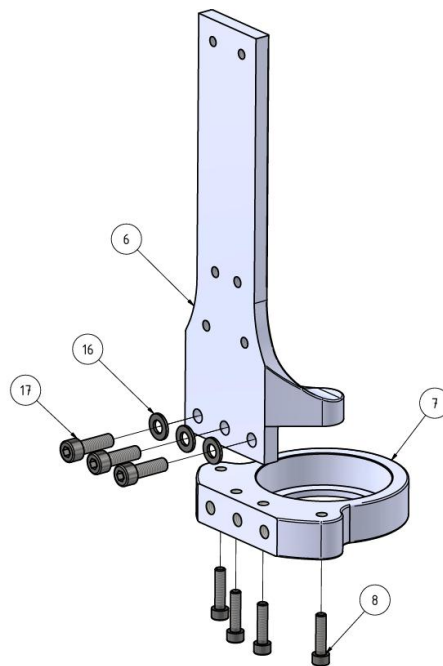


Figura 5.9 - Montagem do corpo principal com a base inferior

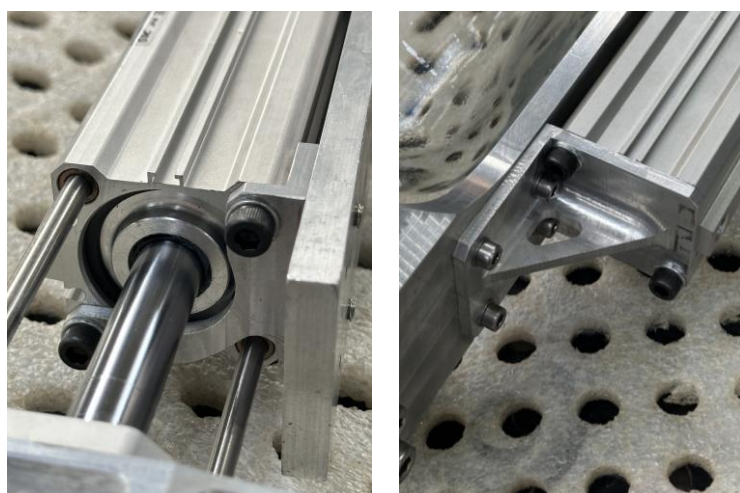
6) Corpo principal; 7) Base inferior; 8) DIN 912-M6x25; 16) DIN 125-A 8,4; 17) DIN 912-M8x25

O corpo principal, representado na Figura 5.9, constitui o elemento estrutural central da garra e é responsável por suportar a maioria dos esforços gerados durante o funcionamento do sistema. É neste componente que o cilindro pneumático é montado, razão pela qual deve apresentar uma rigidez elevada e uma geometria capaz

de garantir a integridade e a estabilidade do conjunto durante todas as fases de operação. Para além de suportar as cargas provenientes do cilindro, o corpo principal assegura também o alinhamento relativo entre a base superior e a base inferior, contribuindo para a precisão global do mecanismo de manipulação da garrafa.

Adicionalmente, o corpo principal apresenta arestas arredondadas nas zonas de contacto com o operador e com as garrafas, minimizando o risco de lesões durante a manipulação e reduzindo a probabilidade de danos às garrafas em caso de contacto accidental durante a operação de carga ou descarga.

Uma das características fundamentais do corpo principal é a integração das furações e superfícies de apoio destinadas aos suportes do cilindro pneumático. Estes suportes, mostrados na Figura 5.10, garantem a correta fixação e orientação do cilindro, assegurando que a força é transmitida de forma axial ao longo do corpo principal e evitando cargas laterais que poderiam comprometer a durabilidade do cilindro ou provocar desalinhamentos. A disposição das furações foi definida para garantir a compatibilidade com o cilindro pneumático selecionado, preservando simultaneamente afastamentos adequados entre os restantes componentes e espaço livre para operações de montagem, manutenção e carregamento das garrafas.



a)

b)

Figura 5.10 - Suportes do cilindro pneumático: a) superior; b) inferior.

A montagem do corpo principal realiza-se através da sua fixação direta à base inferior com parafusos DIN 912-M6x25 e DIN 912-M8x25, conforme indicado na Figura 5.9. Estes elementos de fixação asseguram uma união rígida e estável, sendo essencial que o aperto seja realizado com um binário adequado para evitar folgas ou concentrações de tensão nos pontos de contacto. Tendo em conta que os parafusos são fabricados em aço inox AISI 316 e são apertados diretamente em roscas de alumínio sem qualquer lubrificação, recomenda-se a aplicação de um binário entre 6 e 8 Nm para os M6 e entre 15 e 20 Nm para os M8. Estes intervalos reduzem o risco de gripagem associado ao aço inoxidável e asseguram, simultaneamente, uma pré-carga adequada na união aparafusada, em conformidade com os valores dos binários de aperto habitualmente apresentados em tabelas técnicas de fabricantes de elementos de fixação (Silva, 2024).

5.6.3 Base superior

O componente seguinte, esquematizado na Figura 5.11, consiste na base superior e desempenha um papel crítico no sistema de manipulação da garrafa. A sua função principal é entrar em contacto com a base da garrafa quando a haste do cilindro pneumático recua, garantindo que esta permaneça fixa e alinhada com o centro da base inferior. Para além de suportar a garrafa, a base superior permite a sua rotação controlada, por meio de um rolamento, assegurando um movimento suave e uniforme que contribui para a precisão e repetibilidade do posicionamento da garrafa durante o processo de lixagem.

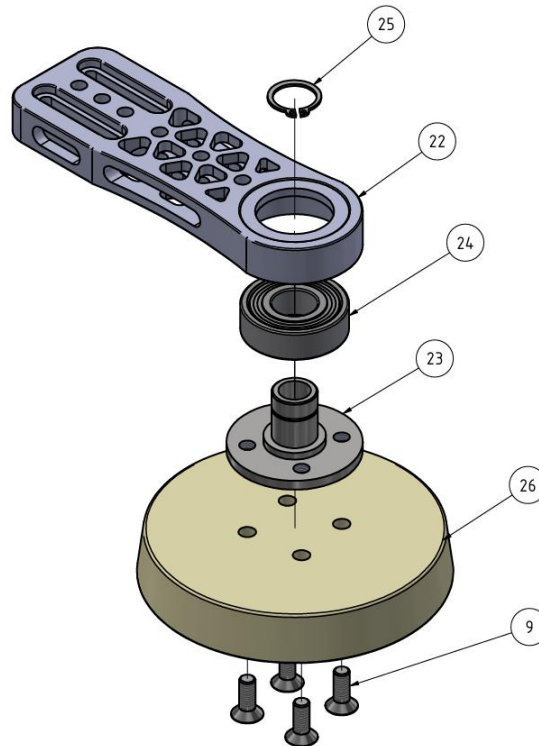


Figura 5.11 - Vista explodida da base superior.

- 9) Parafuso DIN 7991-M6x16; 22) Corpo metálico da base superior; 23) Casquilho superior; 24) Rolamento 6203-2Z; 25) DIN 471-17x1; 26) Base fundo garrafa;

A base superior é composta por vários elementos que se complementam para garantir desempenho, durabilidade e precisão no movimento da garrafa. O corpo metálico da base superior (22), fabricado em alumínio, proporciona rigidez mecânica e resistência à corrosão, servindo de suporte para os restantes componentes. O casquilho superior, fabricado em aço inoxidável AISI 316 (23), também resistente à corrosão, assegura o alinhamento correto do componente 26 e funciona como ponto de fixação, permitindo que a rotação ocorra de forma uniforme. O rolamento 6203-2Z (24) facilita a rotação com baixa fricção e suporta adequadamente o peso da garrafa, garantindo durabilidade e fiabilidade do sistema e, graças à blindagem metálica em ambos os lados, não requer manutenção. Por fim, a garrafa assenta sobre a base de poliamida (*nylon*) (26), que, devido às propriedades do material, protege a superfície da garrafa contra riscos ou danos durante a rotação.

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

O funcionamento da base superior depende da interação coordenada entre o cilindro pneumático e os elementos da própria base. Quando a haste do cilindro recua, a garrafa entra em contacto com a base de poliamida, enquanto o rolamento permite que a rotação ocorra livremente. Esta configuração garante que a garrafa permaneça estável e alinhada, mesmo quando aplicadas pequenas forças laterais ou vibrações durante a manipulação, preservando a integridade da garrafa e do sistema.

Para manter a durabilidade e fiabilidade da base superior, recomenda-se inspeção periódica do rolamento, verificando desgaste ou ruído excessivo. A base de poliamida deve ser inspecionada quanto a fissuras ou deformações e substituída se necessário. Todos os parafusos e fixações devem ser verificados regularmente para garantir que permanecem apertados e alinhados. Esta manutenção preventiva contribui para reduzir o desgaste, prolongar a vida útil do sistema e evitar falhas que possam interromper a produção.

6 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DO CORPO METÁLICO DA BASE SUPERIOR

A otimização topológica visa obter uma nova geometria para um determinado componente, reduzindo a massa do material sem comprometer as suas propriedades mecânicas, em particular, a rigidez. Com base neste princípio, procedeu-se à implementação de alterações no corpo metálico da base superior, com o objetivo de reduzir a massa total do conjunto, sem comprometer o desempenho mecânico. Esta diminuição de massa contribui ainda para reduzir os esforços aplicados ao robô, garantindo o pleno aproveitamento da sua capacidade máxima e reduzindo os esforços transmitidos às guias do cilindro pneumático.

Tendo em conta que, na empresa onde o projeto foi desenvolvido, o único material disponível em quantidade suficiente para a produção dos diversos componentes era o alumínio 7175 T73, este foi utilizado na maioria das peças. Para além da disponibilidade, o alumínio 7175 T73 apresenta elevada resistência à tração, boa resistência à fadiga e facilidade de processamento, características que o tornam adequado para aplicações estruturais exigentes e para a produção de componentes que requerem precisão e durabilidade (SASA Aluminum, 2025).

Na Tabela 6.2 apresentam-se as propriedades do material em questão, tendo-se considerado os mesmos valores para efeitos de estudo.

Tabela 6.1 - Propriedades do alumínio 7175 T73 (Autodesk, 2025).

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	71.3	Gpa
Coefficiente de Poisson	0.33	-
Tensão de rotura	524	MPa
Tensão de cedência	447	MPa
Massa volúmica	2800	kg/m ³

6.1 Análise pelo método de elementos finito do corpo metálico da base superior

A análise desenvolvida baseia-se no método dos elementos finitos, uma técnica numérica amplamente utilizada na resolução de problemas estruturais, que se baseia na subdivisão da geometria contínua em pequenos elementos discretos. Cada elemento representa uma pequena porção da peça real, definida pelo utilizador, na qual as variáveis estruturais relevantes, como deslocamentos e tensões, são calculadas nos nós do elemento. A interligação destes elementos dá origem a uma malha (Mesh) visível na Figura 6.1, que aproxima o comportamento do sólido contínuo, permitindo transformar um problema estrutural complexo num conjunto de equações algébricas tratáveis numericamente, conforme descrito por Zienkiewicz & Taylor (2000) e Bathe (1996).

No presente estudo, foi utilizada uma malha do tipo Curved Mesh Elements, visível na Figura 24, adequada a geometrias com transições curvas ou regiões onde se antecipam gradientes elevados de tensão. Este tipo de malha melhora a capacidade de representação local e contribui para uma solução numericamente mais rigorosa, em linha com as recomendações apresentadas por Cook *et al.* (2002).

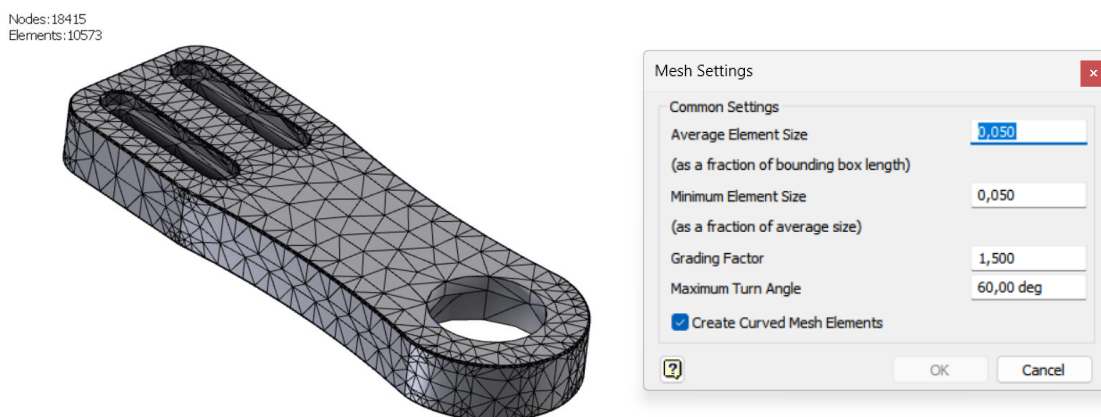


Figura 6.1 - Geometria malhada do corpo metálico da base superior e seleção da opção *Curved Mesh Elements*.

Relativamente às condições de fronteira, visíveis na Figura 6.2, aplicou-se um encastramento na zona onde o suporte é apertado pelos parafusos. Esta condição

representa o facto de, na situação real, a fixação aparafusada limitar significativamente os movimentos dessa área, funcionando como um apoio rígido. Tanto o modelo original quanto o modelo modificado foram analisados exatamente sob as mesmas condições de fronteira, garantindo a comparação direta dos resultados obtidos. Deste modo, de acordo com as recomendações de modelação apresentadas por Logan (2017), o encastramento aplicado simula adequadamente o comportamento estrutural esperado.

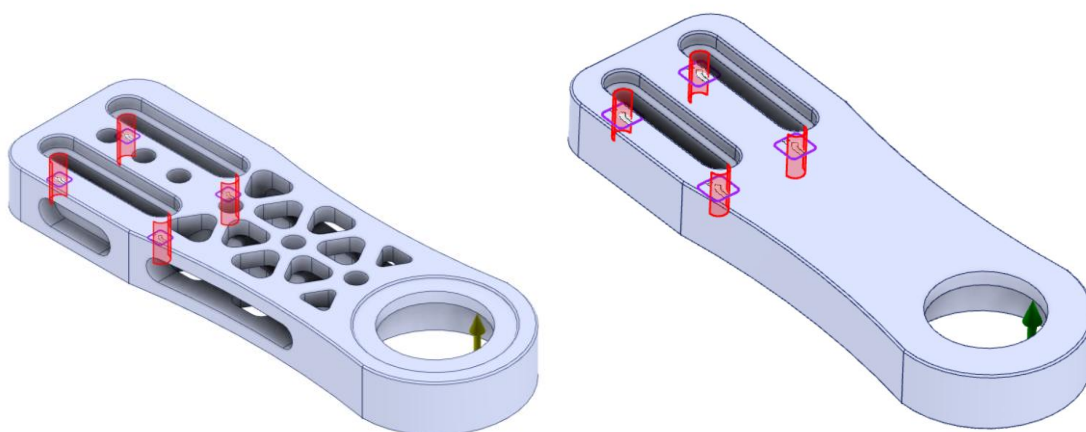


Figura 6.2 - Zonas de encastramento assinaladas a vermelho.

Relativamente à força aplicada ao componente, foi imposta uma carga ascendente de 754 N na zona de apoio do rolamento, destacada a azul na Figura 6.3. Este valor corresponde à força máxima que o cilindro pneumático é capaz de exercer, conforme já descrito na secção 5.4.1.

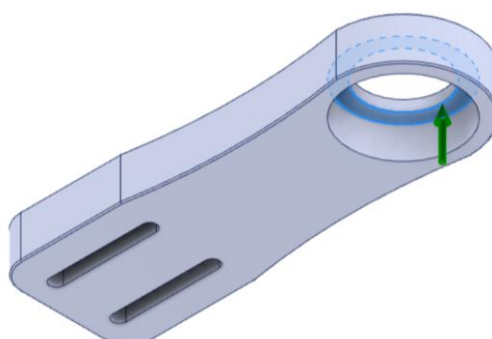


Figura 6.3 - Zona de aplicação da carga ascendente.

Relativamente ao tipo de elemento utilizado neste estudo, optou-se por elementos sólidos tetraédricos parabólicos, constituídos por dez nós, cada um com três graus de liberdade. Este tipo de elemento corresponde aos elementos de segunda ordem usados pelo módulo de simulação do *software* Autodesk Inventor 2025®.

6.1.1 Resultados obtidos para a geometria original da peça

Antes de proceder à modificação da geometria, realizou-se uma análise de elementos finitos da geometria original da peça, de forma a avaliar o seu comportamento estrutural sob as condições de carregamento definidas. Para este efeito, foram aplicadas as restrições e cargas previamente descritas, considerando o material selecionado e a malha, que garantem a precisão dos resultados.

Na Figura 6.4 apresentam-se os resultados da análise de elementos finitos realizada sobre a peça original, considerando uma carga de 754 N (calculada na secção 5.4.1). A análise inclui o efeito da malha utilizada, o número de elementos e nós, a tensão de Von Mises, o coeficiente de segurança, o deslocamento máximo e o erro relativo associado a cada malha.

Carga		754 N		Original			
8 estudos	Malha [mm]	Nº de Elementos	Nº de Nós	Tensão Von Mises [Mpa]	Coefficiente de Segurança	Deslocamento [mm]	Erro [%]
	1,000	2471	4394	167	2,7	0,2442	-
	0,5	2494	4506	149	3,0	0,2399	1,792
	0,2	7304	12829	118,7	3,8	0,2427	1,154
	0,100	10615	18525	125,3	3,6	0,2417	0,414
	0,050	12411	21038	126,1	3,5	0,2459	1,708
	0,01	155400	229852	127,3	3,5	0,2503	1,758
					Tensão Média [Mpa]		126,700

Figura 6.4 - Resultados das simulações da peça original.

Após a análise detalhada e a verificação dos resultados obtidos nas simulações, foi possível concluir que a média das tensões de Von Mises máxima no corpo metálico da base superior é aproximadamente 127 MPa, correspondendo a um coeficiente de

segurança médio de 3,53. Este valor evidencia que o componente em estudo está claramente sobredimensionado face às condições de carregamento aplicadas. A elevada margem de segurança indica que há oportunidades de otimizar a peça.

De acordo com a Figura 6.5, o ponto crítico da peça, ou seja, a região onde se observa a maior concentração de tensões, localiza-se próximo à zona de ligação entre o corpo metálico da base superior e o cilindro pneumático. Apesar de ser a região mais solicitada, a tensão máxima registada permanece bem abaixo do limite elástico do material (446 MPa), o que confirma a segurança da peça.

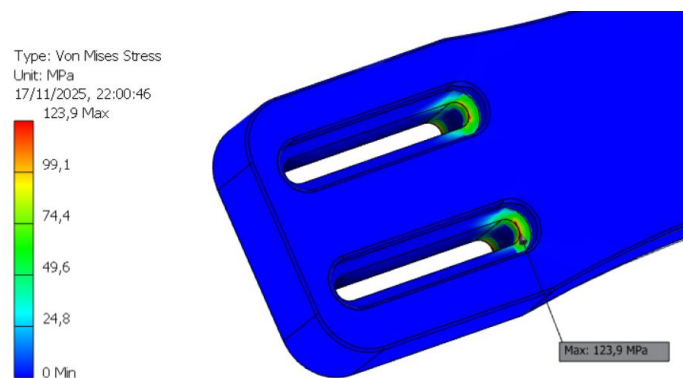


Figura 6.5 - Zona de tensão máxima na peça original.

6.1.2 Resultados obtidos para a geometria modificada da peça

O desenvolvimento da geometria modificada da peça teve como ponto de partida uma análise de estruturas observadas na natureza, particularmente a geometria do favo de mel, reconhecida pela sua elevada eficiência estrutural e pela relação entre resistência e massa.

Embora a aplicação direta de uma geometria hexagonal ou tetraédrica fosse adequada ao objetivo de redução de peso, a sua implementação revelou-se impraticável devido às limitações associadas ao processo de maquinagem e às ferramentas de corte disponíveis na empresa. Dessa forma, optou-se por uma solução alternativa baseada num padrão triangular, que mantém o mesmo princípio estrutural de distribuição equilibrada de material e de resistência, mas que vai de encontro aos recursos de fabrico disponíveis.

Na Figura 6.6 é possível observar a primeira iteração do processo de modificação geométrica.



Figura 6.6 - Corpo metálico da base superior após as primeiras alterações.

Com a aplicação desta nova geometria, foi possível reduzir a massa da peça em 32,6%, correspondente a aproximadamente 78 g, ou seja, um valor significativo tendo em conta as dimensões do componente. Esta diminuição de massa traduz-se numa redução dos esforços transmitidos às guias do cilindro pneumático ao longo dos inúmeros ciclos de operação, contribuindo para reduzir o desgaste e aumentar a vida útil do conjunto. Além disso, a redução de peso facilita o movimento do sistema durante o funcionamento, melhorando a eficiência global e reduzindo a solicitação mecânica dos restantes elementos envolvidos.

O passo seguinte consistiu na análise de tensões (ver Figura 6.7), com o objetivo de avaliar o comportamento da peça após a alteração da geometria. A simulação permitiu identificar uma tensão máxima de 389,3 MPa, embora inferior à tensão de cedência do material, resultando num coeficiente de segurança de apenas 1,14.

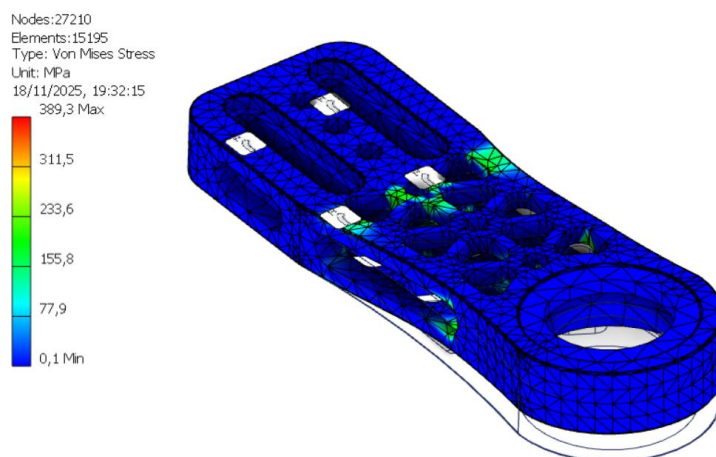


Figura 6.7 - Análise das tensões por elementos finitos da primeira iteração.

O ponto crítico, onde ocorrem as concentrações de tensão mais elevadas, observa-se na Figura 6.8. Encontra-se localizado numa aresta viva, coincidente com uma zona de espessura reduzida de material, o que justifica o valor obtido.

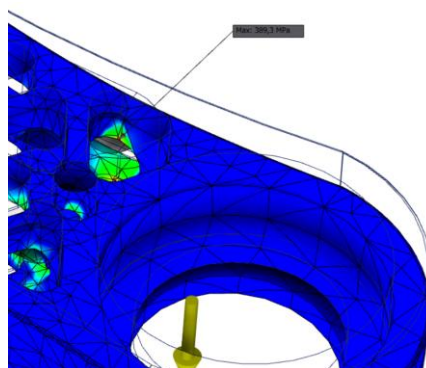


Figura 6.8 - Localização do ponto crítico.

Desta forma, realizou-se uma nova iteração, utilizando a ferramenta *Thicken* nas zonas visíveis na Figura 6.9 para aumentar a espessura das faces assinaladas em 1,5 mm. Apesar deste acréscimo parecer reduzido, a geometria da peça faz com que pequenas variações tenham um impacto relevante na rigidez estrutural e na distribuição de tensões, tal como descrito por Budynas & Nisbett (2020), que enfatizam a influência da forma e da espessura dos componentes sob carregamento no comportamento mecânico.

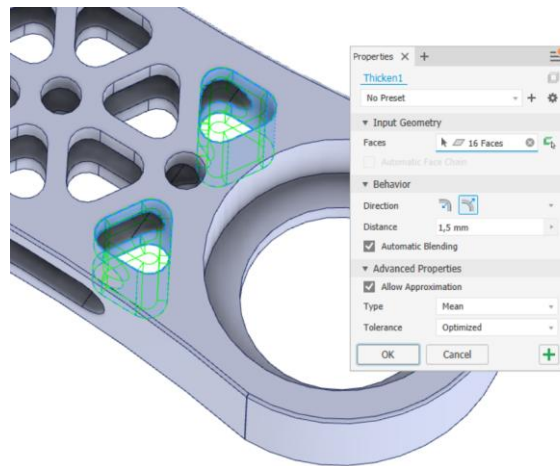


Figura 6.9 - Aumento de 1,5 mm nas faces assinaladas.

A alteração na espessura das faces da peça resultou numa melhoria significativa no comportamento do componente, reduzindo a tensão máxima de Von Mises de 389,3 MPa para 226 MPa na mesma zona crítica, como se observa na Figura 6.10. Em concordância com Budynas & Nisbett (2020), esta redução evidencia que mesmo um aumento relativamente pequeno na espessura das faces contribui para uma distribuição de tensões mais uniforme e uma maior rigidez estrutural.

Carga		754 N		Modificada			
5 estudos	Tamanho do elemento [mm]	Nº de Elementos	Nº de Nós	Tensão Von Mises [Mpa]	Coefficiente de Segurança	Deslocamento [mm]	Erro [%]
	1,00	15673	27061	205,2	2,178	0,7675	-
	0,50	11238	1836	225,0	1,987	0,7775	1,29
	0,20	20503	35621	220,4	2,028	0,7831	0,72
	0,10	21137	36692	233,6	1,914	0,7789	0,54
	0,05	18268	32020	234,6	1,905	0,7823	0,43

Tensão Média [Mpa]	225
--------------------	-----

Figura 6.10 - Resultados das simulações para a geometria modificada da peça.

Durante todas as análises, foi verificada a convergência da malha por meio de um refinamento controlado: partiu-se de uma malha grosseira e foi-se refinando progressivamente, aumentando o número de elementos e nós. Este procedimento é essencial para garantir que os resultados, como as tensões máximas, não dependam da malha, mas representem fielmente o comportamento físico. Todos os resultados

foram anotados num ficheiro Excel, incluindo os erros relativos a cada etapa de refinamento. Este processo de convergência foi aplicado a todas as análises.

O gráfico de convergência apresentado na Figura 6.11 ilustra claramente esta evolução, reforçando a fiabilidade dos valores de tensão e deformação (Parvez et al., 2024).

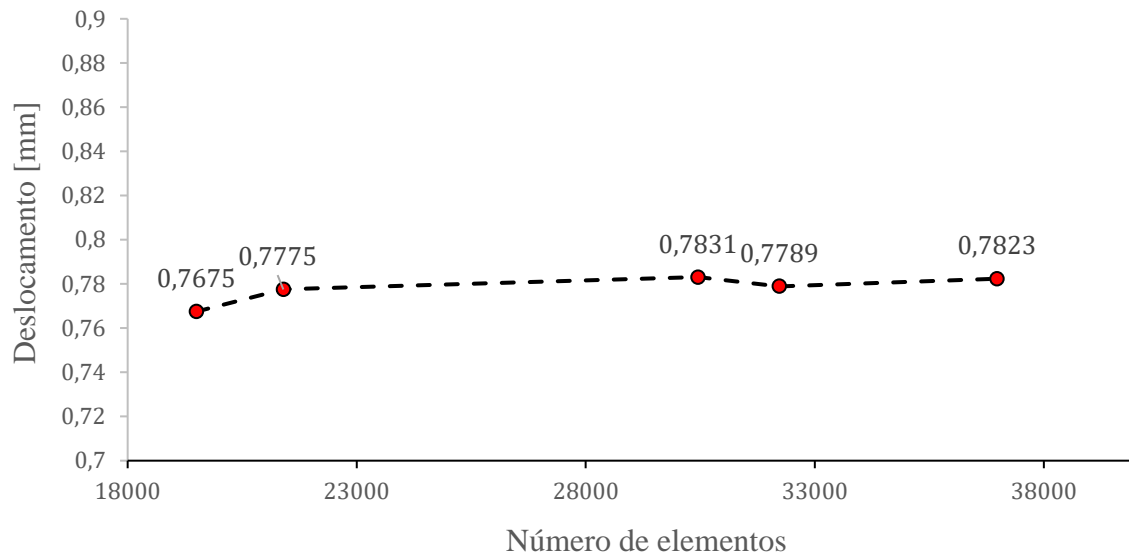


Figura 6.11 - Gráfico da Convergência do Deslocamento.

7 MAQUINAÇÃO DOS COMPONENTES

Na fábrica de Alcobaça da empresa Vista Alegre Atlantis, onde se desenvolveu o presente projeto, encontrava-se disponível uma fresadora CNC, descrita em detalhe na secção 4.3, cuja utilização até então se limitava à maquinação de vidro. Esta disponibilidade permitiu explorar novas aplicações e, apesar de ser um desafio inédito, optou-se por produzir internamente todos os componentes da garra robótica concebida para este projeto, com exceção das peças adquiridas externamente (parafusos, rolamentos, anilhas, etc.).

Desta forma, foi possível conjugar e complementar os conhecimentos adquiridos durante a Licenciatura e o Mestrado em Engenharia Mecânica com a experiência do operador da fresadora CNC, garantindo um fabrico preciso e controlado de cada componente.

Outro ponto a favor da maquinação interna foi a rapidez na produção, uma vez que recorrer a fornecedores externos teria prolongado significativamente os prazos. Ao produzir as peças internamente, foi possível reduzir o tempo de fabrico e ajustar rapidamente os detalhes necessários durante o desenvolvimento do projeto, aumentando a eficiência e o controlo sobre todo o processo.

7.1 Planeamento e programação CNC

Após a decisão de produzir internamente os componentes da garra robótica e definidas as limitações e capacidades da fresadora CNC descritas na secção 4.3, passou-se à preparação detalhada do processo de maquinação.

Para apoiar a definição dos parâmetros de corte, foi criada uma folha de cálculo, apresentada na Figura 7.1, para calcular as velocidades de corte adequadas às fresas disponíveis. Esta ferramenta facilitou a escolha de rotações e avanços consistentes,

garantindo uniformidade entre as operações e simplificando a comunicação com o operador da fresadora CNC.

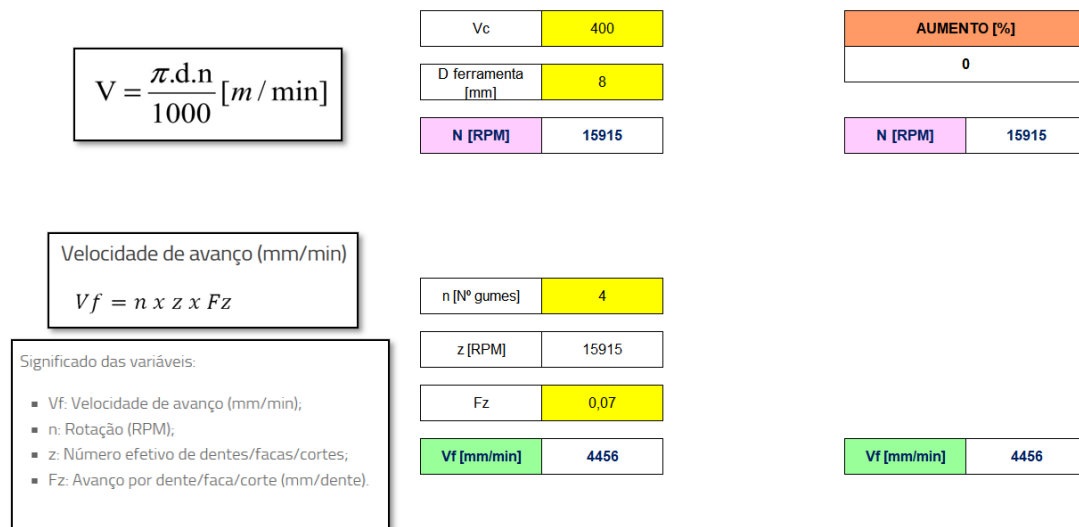


Figura 7.1 - Folha de suporte para cálculo das velocidades de corte.

O principal *software* utilizado para a programação dos percursos da ferramenta foi o Autodesk Fusion®. Este programa permitiu planear e simular todas as operações mais complexas, incluindo estratégias de desbaste, de acabamento e sequências de cortes e trajetórias da ferramenta, antecipando possíveis colisões ou movimentos desnecessários. Participei ativamente na definição de aproximações, profundidades de corte e trajetórias mais adequadas a cada geometria, garantindo que a execução atendesse aos objetivos do projeto. Nas operações mais simples, como furos isolados ou pequenos ajustamentos, recorreu-se diretamente ao controlador da fresadora, o que permitiu executar as tarefas com rapidez e precisão.

7.2 Estratégias e processos de maquinagem

No planeamento das operações de maquinagem procurou-se estabelecer estratégias que assegurassem precisão, controlo e qualidade em todas as peças. Para tal, foram selecionadas fresas de dimensões variadas, adequadas a cada tipo de superfície. Na remoção inicial de material bruto utilizou-se principalmente uma fresa de 20 mm, o que permitiu um desbaste rápido e eficiente. Nas fases de acabamento, foram

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

empregues fresas de 4, 6 e 8 mm, escolhidas em função do acesso às diferentes geometrias e da necessidade de precisão nas cotas finais. Para superfícies curvas e contornos complexos, recorreu-se a uma fresa de ponta esférica de 4 mm, que permitiu reproduzir rigorosamente as curvas da peça, garantindo um acabamento uniforme e o cumprimento das tolerâncias dimensionais previstas no projeto, sendo visível a sua utilização na Figura 7.2.

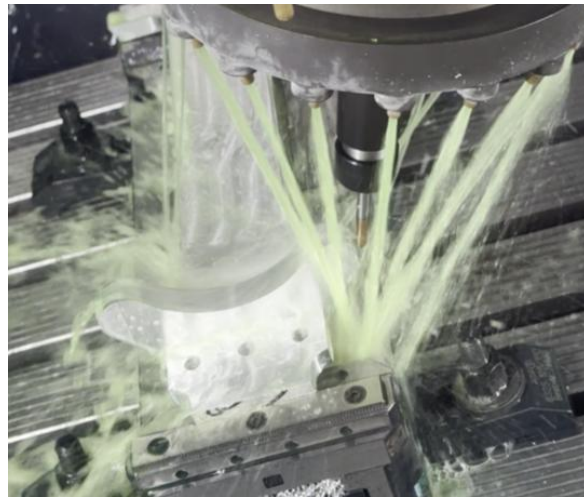


Figura 7.2 - Utilização da fresa de ponta esférica.

Seguindo esta preparação, adotou-se, durante todas as operações, uma estratégia de desbaste inicial, removendo a maior parte do material bruto e deixando uma sobre-espessura de aproximadamente 1 mm para a fase de acabamento. Esta abordagem permitiu um controlo mais eficaz da peça durante os cortes mais agressivos, reduzindo a vibração e evitando deformações que pudessem comprometer a geometria, assegurando o cumprimento de cotas críticas, como é o caso das zonas de contacto dos rolamentos (Burhanudin et al., 2022).

Para peças com geometrias mais complexas, como é o caso do corpo principal (ver seção 5.6.2 e Figura 5.9), foram exploradas, no *software* Autodesk Fusion®, diferentes estratégias de aproximação e percursos da ferramenta. Após várias simulações, considerou-se vantajoso recorrer ao quinto eixo da fresadora CNC para reproduzir,

com maior exatidão, as diversas curvas da peça. Na Figura 7.3 ilustra-se este processo de maquinação.

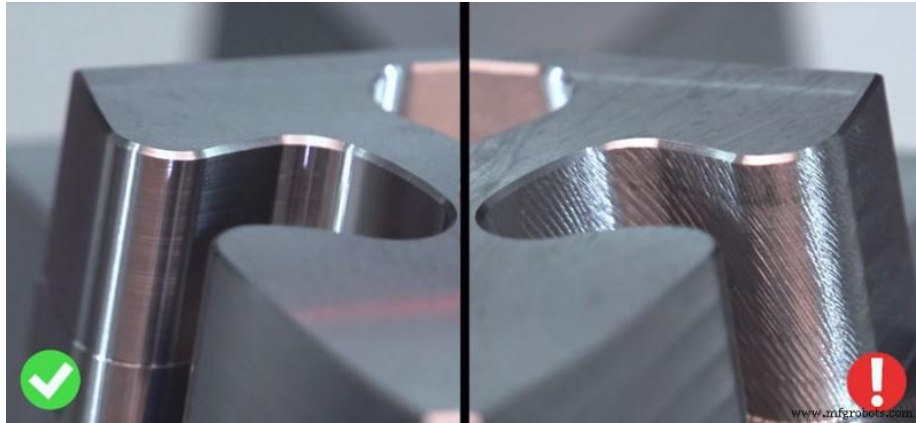


Figura 7.3 - Maquinação do corpo superior pelo quinto eixo da fresadora CNC.

7.3 Desafios e adaptações durante a maquinação

Durante o fabrico surgiram dois desafios principais que exigiram adaptações no processo. O primeiro foi a vibração de algumas peças, com o corpo principal a apresentar oscilações excessivas devido à sua geometria alongada e à dificuldade em garantir uma fixação adequada. Esta vibração resultava num acabamento superficial insatisfatório e numa variação das cotas em relação às dimensões pretendidas. Para mitigar o problema, a profundidade de corte foi reduzida e privilegiaram-se movimentos mais suaves e controlados, o que permitiu limitar as oscilações da peça e assegurar o cumprimento das tolerâncias dimensionais previstas.

A Figura 7.4 mostra a diferença no acabamento superficial de uma peça submetida a vibração em comparação com uma peça maquinada de forma estável. À direita observa-se a superfície afetada pela vibração e, à esquerda, a superfície com qualidade adequada.



a)

b)

Figura 7.4 – Comparação do acabamento superficial de a) peça submetida a vibração e b) peça maquinada de forma estável (MFG Robots, 2025).

O segundo desafio esteve relacionado com a geometria cilíndrica do material bruto disponível, dado que a fixação direta do material na prensa, equipamento utilizado para fixá-lo durante a maquinagem, se revelou difícil devido à geometria arredondada. Para contornar este problema, em alguns casos foram realizados pequenos rasgos nas faces opostas do cilindro, conforme assinalado na Figura 7.5, criando superfícies planas que asseguram um aperto seguro. Esta solução simples e eficaz preveniu o deslizamento da peça durante a maquinagem, assegurando não apenas a precisão dimensional, mas também a qualidade do acabamento superficial e a segurança em todas as operações.



Figura 7.5 - Rasgos (assinalados pela seta) efetuados no material com geometria cilíndrica.

8 DISPOSIÇÃO E PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ

Após a conceção e fabrico da garra robótica, o passo seguinte consistiu na programação e configuração do robô para manipular a garrafa de forma segura e controlada, permitindo a execução do ciclo de lixagem com precisão, repetibilidade e adaptado às exigências do processo.

Neste capítulo, serão apresentados a disposição da célula robotizada, incluindo medidas de segurança, a estrutura do ciclo de lixagem, os princípios de programação adotados, a definição da ferramenta, pontos intermédios e ajustes progressivos, de forma a ilustrar como a integração entre *hardware* e *software* assegura a fiabilidade e eficiência do sistema automatizado.

8.1 Disposição do robô

O robô, visível na Figura 8.1, já se encontrava instalado e em operação na fábrica da empresa onde foi desenvolvido o projeto.

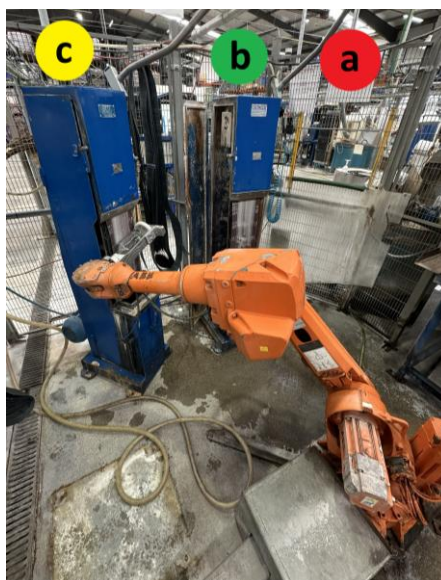


Figura 8.1 - Disposição do robô: a) zona de carregamento; b) lixa vertical 1; c) lixa vertical 2.

Não sendo um robô colaborativo, a célula de segurança estava devidamente isolada por meio de gradeamento metálico, garantindo o seu funcionamento em condições de segurança. Esta solução é habitual em aplicações industriais que envolvem robôs não colaborativos, uma vez que a separação física entre o operador e a zona de trabalho do robô constitui uma das medidas de proteção recomendadas pelas normas internacionais de segurança ISO 10218-1 (International Organization for Standardization, 2011) para sistemas robotizados.

O *layout*, incluindo a célula de segurança, sensores, atuadores e restantes periféricos, foi previamente montado por profissionais qualificados, de acordo com os regulamentos aplicáveis. Dado que a instalação e certificação da célula de segurança não constituem o foco deste projeto, considerou-se que o robô e todos os seus acessórios foram implementados conforme as normas vigentes, assegurando a proteção dos operadores e o cumprimento dos requisitos legais de segurança inerentes aos sistemas de automação industrial. Esta abordagem encontra fundamento no ambiente industrial, no qual as entidades responsáveis pelas instalações garantem a conformidade com as normas de segurança ISO 10218-1 (International Organization for Standardization, 2011) para robôs industriais e ISO 12100 (International Organization for Standardization, 2010) para riscos em máquinas.

8.2 Estrutura do ciclo de lixagem da garrafa

Antes de detalhar a programação do ciclo de lixagem, importa contextualizar a linguagem utilizada. O robô industrial foi programado em RAPID, a linguagem proprietária da ABB, concebida para controlar movimentos, ferramentas e operações complexas de forma precisa. Esta linguagem permite definir trajetórias, implementar ciclos repetitivos, ajustar parâmetros de contacto e integrar verificações de segurança, características essenciais para processos automatizados como a lixagem de garrafas (ABB Robotics, 2025).

Para facilitar a compreensão do funcionamento do sistema e da sequência de movimentos, a Figura 8.2 apresenta um fluxograma que sintetiza todas as etapas do processo, desde a introdução, pelo operador, do número de ciclos de lixagem pretendidos até à sua conclusão, com o retorno do robô à estação de carregamento.

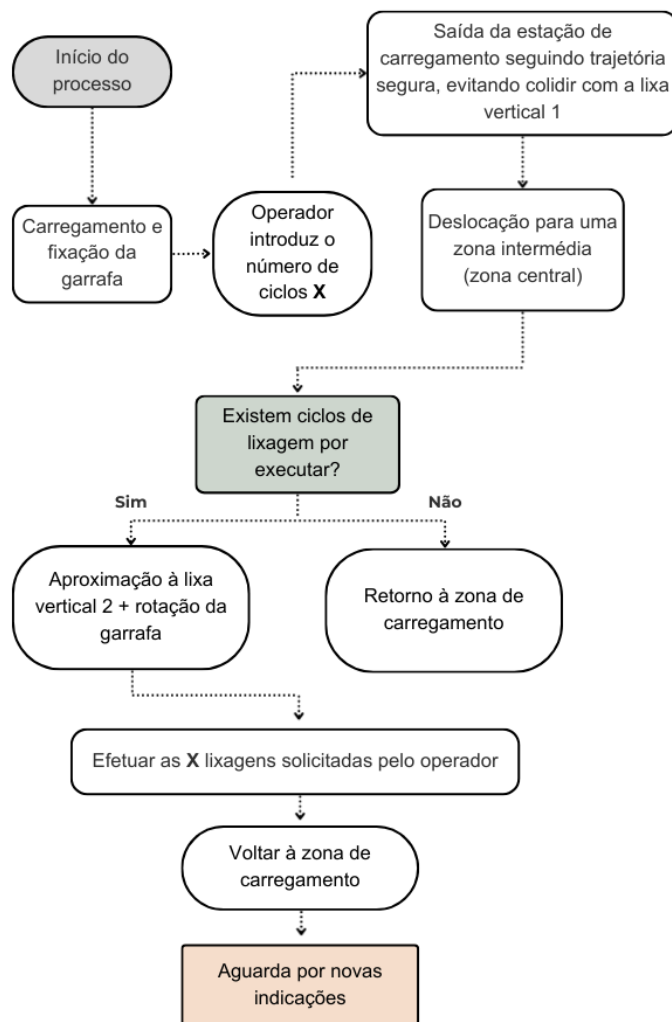


Figura 8.2 - Fluxograma do procedimento de lixagem da garrafa.

O programa desenvolvido para controlar o robô baseou-se num código previamente existente na empresa e originalmente utilizado para uma operação distinta, relacionada com o corte de cálices. A reutilização deste código constituiu uma vantagem significativa, pois permitiu acelerar o desenvolvimento, reduzir erros decorrentes do desconhecimento inicial da linguagem RAPID e garantir a compatibilidade estrutural com o sistema já instalado.

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

No entanto, a adaptação deste código a um processo totalmente diferente – lixagem de garrafas – exigiu um trabalho intensivo de ajuste fino, sobretudo ao nível das trajetórias, dos pontos de aproximação e dos parâmetros de contacto.

É neste contexto que a utilização do *FlexPendant* (ver Figura 8.3), diretamente ligado ao controlador do robô, se revelou essencial durante a programação do robô, pois permitiu refinar os pontos de aproximação e posicionamento do robô, ajustar parâmetros, testar segmentos do programa e validar velocidades e trajetórias em ambiente real, garantindo que os movimentos definidos em código correspondessem às exigências práticas do processo.



Figura 8.3 - Dispositivo *FlexPendant*.

Em vez de se proceder à explicação detalhada de cada linha ou instrução do código RAPID, apresentam-se apenas os princípios que orientaram o desenvolvimento do ciclo de lixagem e a lógica funcional que estrutura o programa. Esta abordagem foi adotada porque a análise exaustiva de todas as instruções não constitui o foco principal desta dissertação, que abrange um conjunto alargado de áreas, tornando desnecessária uma descrição extensa de todo o código.

A programação foi concebida para garantir que o robô progride para as fases de lixagem apenas quando se encontram reunidas todas as condições necessárias de segurança e de posicionamento. O ciclo só é iniciado se o robô estiver corretamente

situado na zona de carregamento e se todos os sistemas de segurança estiverem ativos, nomeadamente a porta da célula de segurança e a barreira ótica. Este conjunto de verificações impede o robô de realizar movimentos enquanto a área de trabalho não estiver comprovadamente livre, reforçando os princípios de segurança industrial definidos pelo fabricante do robô e recomendados para células robotizadas (ABB Robotics, 2019).

Outro elemento fundamental para a correta execução do ciclo é a definição da ferramenta utilizada pelo robô, representada no código pela estrutura *tooldata protoJG* (ver Figura 8.4). Esta estrutura contém a descrição geométrica da garra, incluindo a posição do ponto TCP (*Tool Center Point*) e a orientação associada. A atribuição rigorosa destas dimensões é essencial, uma vez que o robô baseia todos os cálculos de trajetória — posições de aproximação, distâncias de segurança, zonas de transição e movimentos de contacto — na localização exata do TCP relativamente à flange do punho. No caso da garra robótica desenvolvida, cujo comprimento e *offset* são significativamente superiores aos de uma ferramenta padrão, a precisão desta definição torna-se ainda mais crítica. A Figura 8.4 apresenta o excerto de código onde esta ferramenta é parametrizada:

```
PERS wobjdata lixavertical:=[FALSE,TRUE,"lixavertical",[[0,0,0],[1,0,0,0]],[[0,0,0],[1,0,0,0]]];
```

Figura 8.4 - Excerto de código referente à definição da ferramenta do robô (*tooldata*).

A modelação correta da ferramenta garante que o robô compreende a distância real entre os seus eixos e o ponto efetivo de contacto com a garrafa, permitindo movimentos fluídos e evitando colisões com as lixas ou com a estrutura da célula. Além disso, assegura que a repetibilidade das trajetórias não é comprometida por erros de medição, contribuindo para a consistência global do processo automatizado.

Após a validação inicial, o robô abandona a zona de carregamento seguindo uma trajetória previamente definida, construída a partir da combinação de movimentos lineares e articulares para garantir fluidez e evitar colisões com os elementos fixos da

célula, como a lixa vertical 1, utilizando, para tal, uma zona intermédia que, no excerto de código da Figura 8.5, é identificada como *pseg* e serve como referência geométrica e base para a construção de todas as trajetórias subsequentes.

```
PROC lixagarrafaJG()
  SetDO D010_1,0;
  MoveJ pseg, v1000, z50, protoJG;
  MoveJ JGp1, v1000, z50, protoJG;
  MoveJ JGp11, v1000, z50, protoJG;
  MoveJ JGp21, v1000, z50, protoJG;
  MoveJ JGp31, VLIXAMENTO, z1, protoJG;
  MoveJ JGp41, VLIXAMENTO, z1, protoJG;
  MoveJ JGp21, vmax, z1, protoJG;
  MoveJ JGp31, VLIXAMENTO, z1, protoJG;
  MoveJ JGp41, VLIXAMENTO, z1, protoJG;
  MoveJ JGp51, vmax, z1, protoJG;
  !MoveJ JGp61, v1000, z50, protoJG;

ENDPROC
```

Figura 8.5 - Excerto de código com a definição do ponto intermédio *pseg*,

A decisão central do algoritmo baseia-se na verificação do número de ciclos de lixagem definidos pelo operador. Esta lógica, implementada por meio de um menu apresentado no *FlexPendant*, permite evitar movimentos desnecessários e garante que o robô regressa automaticamente à posição de carregamento quando não há trabalho adicional a realizar. Caso o operador selecione vários ciclos, o programa executa um *loop* repetitivo que conduz o robô à lixa vertical 2 para efetuar cada passagem.

O ajuste progressivo da profundidade de contacto entre a garrafa e a lixa é igualmente atualizado a cada ciclo de lixagem, sendo implementado mediante a alteração controlada do referencial da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 8.6.

```
lixavertical.uframe.trans.z:=- (inc/10);  
MoveJ JGp31, vmax, z50, protoJG;  
MoveJ JGp41, vmax, z50, protoJG;  
MoveJ JGp51, vmax, z50, protoJG;  
MoveJ JGp61, vmax, z50, protoJG;  
MoveJ JGp71, v1000, z50, protoJG;  
inc:=inc+1;  
lixavertical.uframe.trans.z:=0;  
ENDPROC
```

Figura 8.6 - Código de implementação do ajuste progressivo por meio de alteração do referencial da ferramenta.

Concluído o número de ciclos estipulados, o robô regressa à zona de carregamento, onde retoma a espera de novas instruções do operador.

Em síntese, a programação desenvolvida estruturou o ciclo de lixagem de forma segura, controlada e repetível, permitindo que o robô execute os movimentos com precisão e previsibilidade. A utilização de referências geométricas, pontos intermédios e ajustes progressivos assegura que cada trajetória respeita as restrições da célula e evita colisões com elementos fixos, enquanto a lógica de verificação de ciclos e de condições de segurança garante que o robô progride apenas quando todas as pré-condições estão satisfeitas. Desta forma, a programação estabelece uma base sólida para o funcionamento eficiente do sistema automatizado, assegurando fiabilidade e consistência sem comprometer a integridade da garrafa, da garra desenvolvida e do próprio robô.

9 CONCLUSÕES

9.1 Resultados dos testes efetuados

Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foram testadas aleatoriamente 50 garrafas de um lote de produção. Todos os resultados foram devidamente registados e organizados de forma sistemática, permitindo determinar com rigor o comportamento global do processo.

Após a lixagem, cada garrafa foi submetida ao controlo de qualidade, avaliando-se a presença de imperfeições e a uniformidade do acabamento superficial. Com base nestes resultados, foi possível quantificar a eficácia do sistema automatizado, tanto em termos da estabilidade proporcionada pela garra robótica, quanto da duração média do ciclo de lixagem, permitindo analisar o desempenho global do processo.

Em termos de desempenho, verificou-se que, em média, apenas duas em cada oito unidades apresentavam pequenas imperfeições remanescentes, o que corresponde a uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 80%, valor obtido pela normalização dos resultados das 50 amostras. Esta taxa mostra-se significativamente superior à do processo manual, no qual metade das garrafas necessita de nova lixagem, resultando numa taxa de aproveitamento de apenas 50% (Figura 9.1).

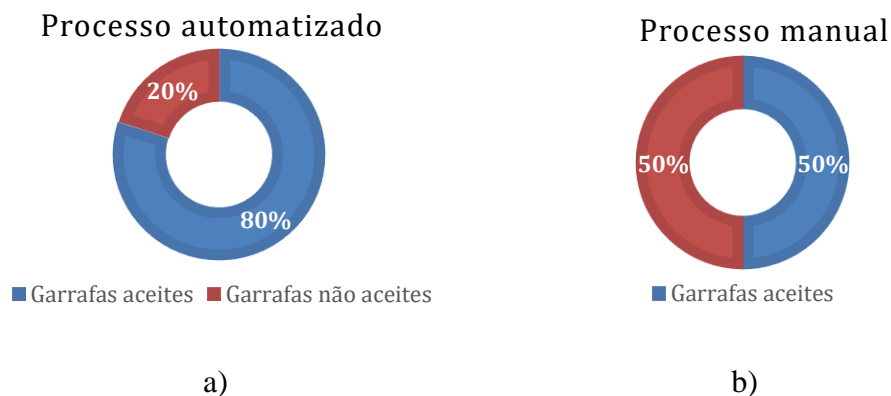


Figura 9.1 - Comparação das taxas de aproveitamento entre os processos a) automatizado e b) manual.

A Figura 9.2 ilustra a variabilidade observada entre duas garrafas do mesmo lote, submetidas às mesmas condições de lixagem. Na garrafa da esquerda, os defeitos foram totalmente eliminados, enquanto na da direita ainda se verificam imperfeições, que se devem à incapacidade do robô em ajustar dinamicamente a pressão e a trajetória em função das pequenas variações da superfície.



Figura 9.2 - Resultados de lixagem obtidos nos testes.

Embora a garrafa da direita da Figura 9.2 não cumpra integralmente os requisitos de qualidade definidos, esta garrafa – tal como outras – não é contabilizada como desperdício, visto que pode ser submetida novamente ao processo de lixagem até que todos os defeitos sejam eliminados. O resultado final desse retrabalho, com a garrafa devidamente lixada, é visível na Figura 9.4, assegurando um elevado nível de aproveitamento final e reduzindo significativamente as perdas de produto.

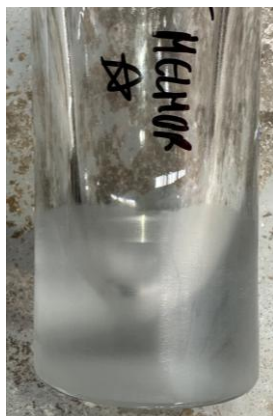


Figura 9.3 - Pormenor de garrafa que cumpre os padrões de qualidade.

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

Além da qualidade, analisou-se também a eficiência temporal do sistema. Considerando uma produção mensal de aproximadamente 800 garrafas, cada uma leva cerca de 12 minutos a ser lixada manualmente, enquanto o ciclo automatizado tem uma duração média de 1 minuto por garrafa, incluindo o seu carregamento. Em termos de volume mensal, isto traduz-se em cerca de 160 horas de trabalho manual, em contraste com apenas 13 horas do processo automatizado, o que representa uma redução de aproximadamente 147 horas por mês, ou seja, uma diminuição superior a 90% do tempo total necessário para a operação de lixagem (ver Figura 9.4). Estes resultados evidenciam um impacto significativo, demonstrando que a solução automatizada reduz drasticamente o tempo de processamento e assegura maior consistência e uniformidade nos resultados.

Tempos gastos na lixagem de
800 garrafas

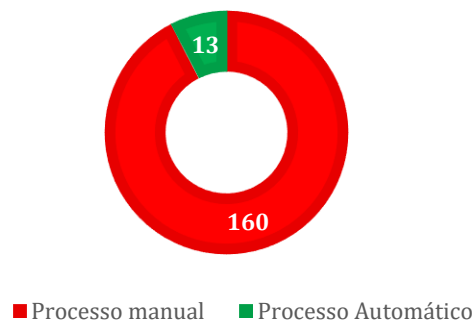


Figura 9.4 - Comparação dos tempos de lixagem de 800 garrafas entre os processos automatizado e manual.

Assim, apesar do processo manual ainda beneficiar da capacidade adaptativa humana em situações específicas, o sistema desenvolvido estabelece uma base tecnológica sólida para a automatização do acabamento superficial das garrafas. A solução concebida revelou-se eficiente, repetível e claramente competitiva em termos de produtividade, apresentando um elevado potencial de aplicação industrial e margem de evolução futura.

9.2 Considerações finais

O projeto centrou-se na automatização do processo de lixagem de garrafas, com o objetivo de aumentar a produtividade, melhorar a consistência do acabamento e aproveitar de forma eficiente os recursos já disponíveis na fábrica. Para tal, foi possível reutilizar um robô industrial previamente instalado, incluindo todo o seu *layout* e os equipamentos associados, permitindo uma integração funcional e económica no contexto industrial existente.

O trabalho desenvolvido consistiu numa sequência de etapas interligadas, iniciando-se pelo estudo e planeamento do processo de lixagem, que definiu os critérios de qualidade e os requisitos dimensionais das garrafas, seguido da seleção e adaptação do robô e dos sistemas existentes, garantindo compatibilidade com a nova célula de trabalho. Desenvolveu-se a garra robótica para assegurar a fixação e estabilidade das garrafas, enquanto a programação do ciclo procurou reproduzir os movimentos essenciais do operador. O desempenho do sistema foi validado por meio de testes sistemáticos, com análise da qualidade do acabamento e da produtividade, permitindo comparar os resultados do processo automatizado com os obtidos manualmente.

A garra robótica demonstrou elevada fiabilidade e segurança, garantindo a estabilidade das garrafas e evitando falhas ou deslizamentos (Groover, 2020), enquanto a programação do robô, embora limitada relativamente à perceção humana e à adaptação dinâmica, assegurou uma distribuição uniforme do desgaste e reproduziu com sucesso os movimentos essenciais do operador (Siciliano & Khatib, 2016). A Figura 9.5 ilustra o robô equipado com a garra robótica durante o manuseamento de uma garrafa, permitindo visualizar a configuração adotada no sistema automatizado.



Figura 9.5 - Garra robótica manuseando uma garrafa.

Com a implementação do sistema automatizado, a duração média de processamento por garrafa reduziu cerca de 12 minutos, no processo manual, para aproximadamente 1 minuto, o que representa uma redução superior a 90% do tempo total de produção mensal de 800 garrafas. Estes resultados evidenciam ganhos significativos em produtividade, consistência e qualidade do acabamento.

Em resumo, o projeto permitiu desenvolver e validar uma solução automatizada eficaz, segura e economicamente viável, cumprindo integralmente os objetivos inicialmente definidos. A reutilização do robô e do seu sistema mostrou-se funcional e eficiente. A garra robótica assegurou a estabilidade das garrafas e a programação do ciclo reproduziu os movimentos essenciais do operador humano. Este trabalho constituiu um desafio e uma oportunidade de aprendizagem, uma vez que permitiu compreender as limitações e potencialidades da automatização, reforçando a importância de adaptar soluções existentes a novos contextos industriais e estabelecendo uma base sólida para futuras melhorias.

9.3 Sugestão de trabalhos futuros

Embora o sistema desenvolvido tenha demonstrado elevados níveis de eficiência e consistência na lixagem de garrafas, no futuro poderão ser explorados e aprimorados outros aspetos relevantes.

Uma das principais melhorias para o sistema desenvolvido poderá ser a integração de sensores adicionais e de sistemas avançados de visão computacional, capazes de detetar defeitos em tempo real e permitir ajustes automáticos no processo de lixagem. A incorporação destes sistemas poderá aumentar ainda mais a taxa de sucesso do processo, garantindo acabamentos mais uniformes e reduzindo a necessidade de retrabalho.

Um exemplo prático deste tipo de integração poderá ser a implementação de uma câmara de alta definição, visível na Figura 9.6, capaz de gerar uma nuvem de pontos. Esta abordagem permitirá ao robô adaptar-se à geometria real das peças sem necessidade de mecanismos de alinhamento adicionais, conferindo flexibilidade e eficiência à célula robotizada (Zivid, 2025). A combinação da perceção tridimensional com controlo adaptativo do robô será tecnicamente viável e altamente eficaz para tarefas industriais que exigem precisão e adaptação a variações geométricas.



Figura 9.6 - Câmara Zivid One+ (Zivid, 2025).

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

Outra melhoria relevante poderá ser a integração de algoritmos de inteligência artificial para otimizar o percurso do robô. Esta abordagem permitirá reduzir ainda mais o tempo de ciclo e garantir maior uniformidade no acabamento das garrafas, tornando o processo mais eficiente e consistente.

Adicionalmente, a adaptação da garra robótica e do sistema de manipulação para diferentes formatos e tamanhos de garrafa poderá aumentar significativamente a flexibilidade industrial da solução.

Por fim, poderá ser vantajoso desenvolver estratégias de manutenção preventiva condicionada, com monitorização contínua do desgaste da lixa utilizada no processo de lixagem. Esta abordagem permitirá identificar o momento ideal para a substituição da lixa, minimizando paragens não planeadas, prolongando a vida útil dos equipamentos e garantindo a consistência do acabamento das garrafas. Diagramas ou gráficos de monitorização do desgaste das lixas poderão ser utilizados para ilustrar de forma clara o potencial destas melhorias e apoiar a tomada de decisão na manutenção preventiva.

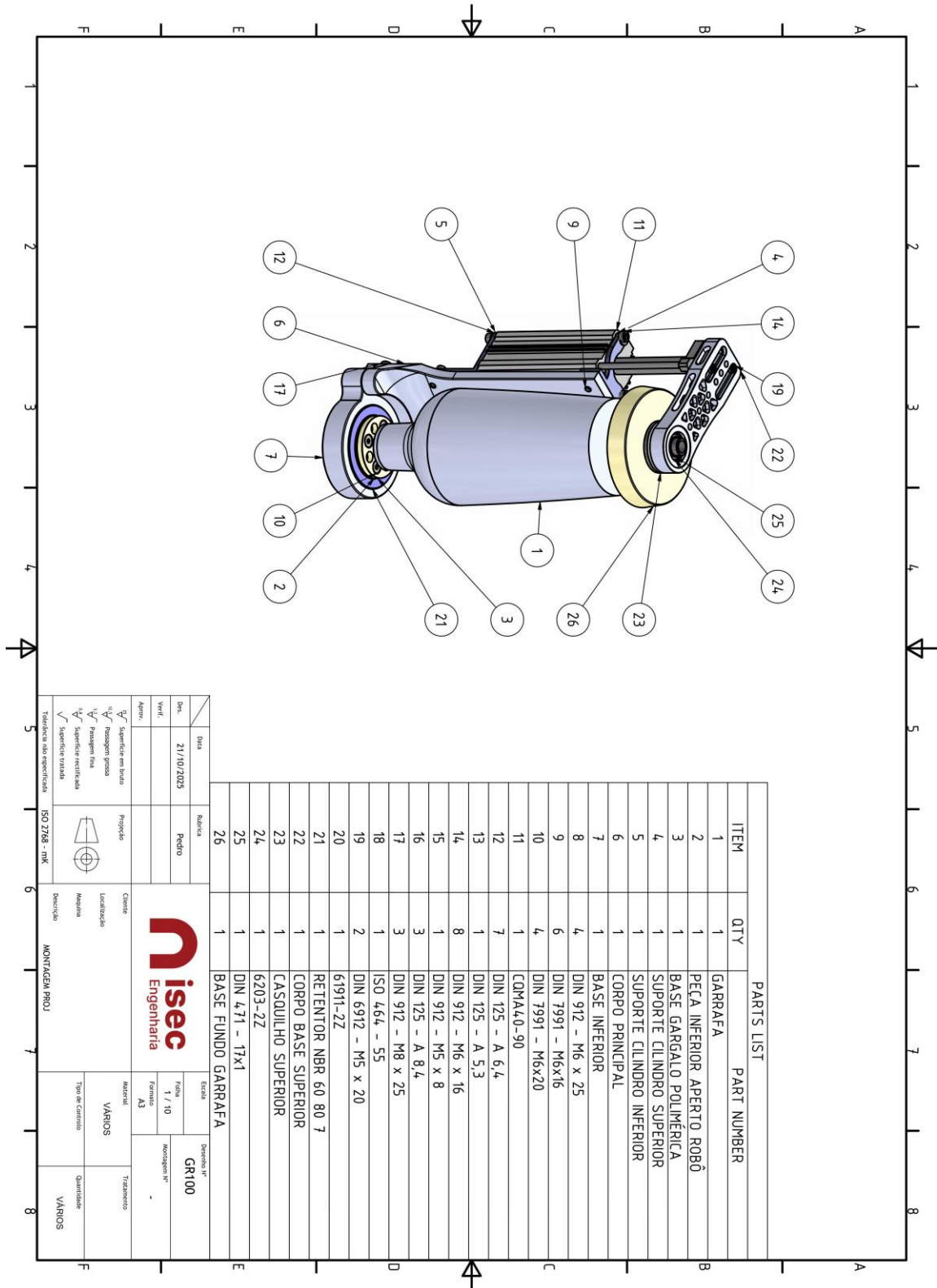
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB Robotics. (2015). *ABB IRB 2600 product specification*. ABB Robotics.
- ABB Robotics. (2025). *Product specification – IRB 2600*. ABB.
- ABB Robotics. (2025). *Technical reference manual*. ABB Robotics.
<https://fs.gongkong.com/files/technicalData/201309/2013090913353800001.pdf>
- ASM International. (2008). *Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials* (Vol. 2). ASM International.
- Autodesk. (2025). Autodesk Inventor 2025 [Base de dados do Software]. Autodesk, Inc.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Brosed, F., Santolaria, J., Aguilar, J., & Guillomía, D. (2012). Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Burhanudin, B., Margono, M., Suryono, E., Atmoko, N., & Zainuddin, Z. (2022). The Effect of Finishing Allowance and Milling Method on Surface Roughness in the Finishing Process of Al5052 and Al7075. *Key Engineering Materials*, 63-71.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Dollar, A. M., & Howe, R. D. (2006). A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.
- Dutch Expat Shop. (s.d.). *Havana Club Máximo*. Dutch Expat Shop:
https://www.dutchexpatshop.com/en/havana-club-maximo.html?gad_source=1&gad_campaignid=22369048716&gclid=CjwKCAiA24XJBhBXEiwAXEI03zR6EaSBkMNcICXptNFy_H23YE1Q4Bq9c5xR9RiYM_EnzvHDLWPxmRoC7U8QAvD_BwE
- Epick, R. (2022). *Robotiq E-Pick vacuum gripper [3D model]*. free3d.
- Esposito, A. (2003). *Fluid power with applications* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Gonzalez, C. (April de 2015). *What's the Difference Between Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Actuators?* Machine Design:
<https://www.machinedesign.com/linearmotion/whats-difference-between-pneumatic-hydraulic-and-electrical-actuators>

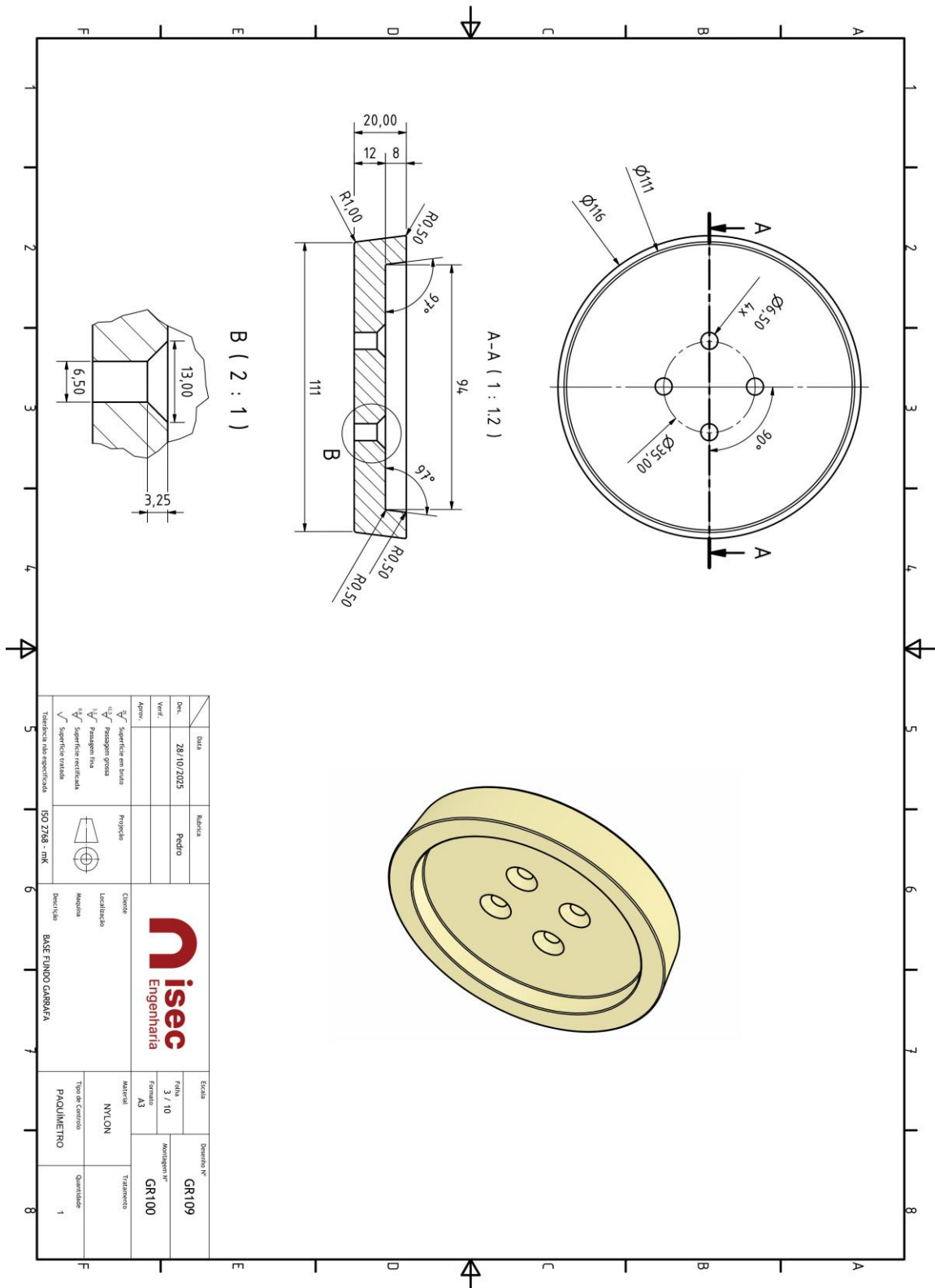
- Groover, M. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (7th ed.). Wiley.
- International Organization for Standardization. (2004). *ISO 9409-1:2004 – Manipulating industrial robots – Mechanical interfaces*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jiang, L. T., & Smith, J. R. (2012). Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping. *ICRA*.
- Logan, D. L. (2017). *A first course in the finite element method* (6th ed.). Boston: Cengage Learning.
- MFG Robots. (2025). *Machining vibration effects on surface finish*. MFG Robots: <https://pt.mfgrobots.com/mfg/mpm/1004041822.html>
- MobileHydraulicTips. (2013). *Hydraulic grippers*. Mobile Hydraulic Tips: <https://www.mobilehydraulictips.com/hydraulic-grippers/>
- Mohd, N., Wahab, D., & Ramli, R. (2018). *Review of grippers for handling non-rigid parts in industrial automation* (Vol. 38). Assembly Automation.
- Parvez, N., Amjad, S., Dey, M., & Picu, C. (12 de jan de 2024). *Methodological Aspects and Mesh Convergence in Numerical Analysis of Athermal Fiber Network Material Deformation*. Fibers – MDPI: <https://www.mdpi.com/2079-6439/12/1/9>
- Rawson, H. (2002). *Glass manufacture*. Butterworth-Heinemann.
- RS Components. (s.d.). *Pneumatic manual control valves*. Retrieved 1 de 12 de 2025, from RS Components: <https://no.rs-online.com/web/p/pneumatic-manual-control-valves/4202878>
- SASA Aluminum. (2025). *Heat treatment and machining techniques for aluminum 7175 sheet*. SASA Aluminum. <https://www.sasaaluminum.com/news/heat-treatment-and-machining-techniques-for-aluminum-7175-sheet>
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.
- Silva, C. R. (2024). *Tabela de Torque de Parafusos — Guia Completo 2024*. CotaFix: <https://cotafix.com.br/tabela-torque-completa>
- SMC Corporation. (2023). *Pneumatic actuators and grippers catalogue*. Tokyo: SMC.
- Universal Robots. (2020). *Robot gripper showdown: air gripper vs electric gripper*. <https://www.universal-robots.com/blog/robot-gripper-showdown-air-gripper-vs-electric-gripper/>
- Zienkiewicz, O., & Taylor, R. (2000). *The finite element method*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Zivid. (2025). *High quality 3D vision accelerates Siemens' maritime battery production*. Zivid: <https://www.zivid.com/application-stories/siemens-manufacturing-and-logistics-robot-with-3d-vision>

ANEXOS

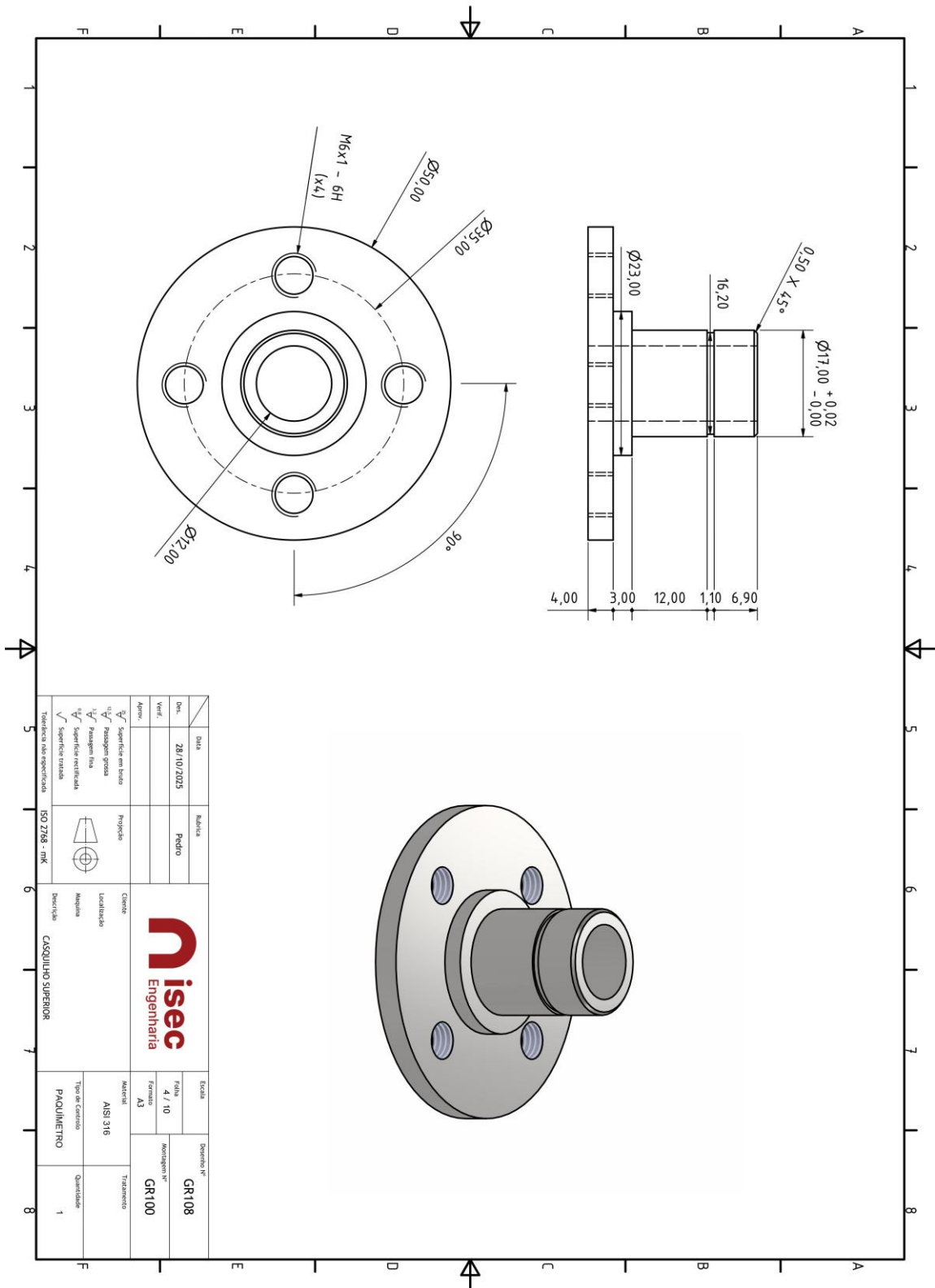
Anexo I – Desenho 2D da garra desenvolvida



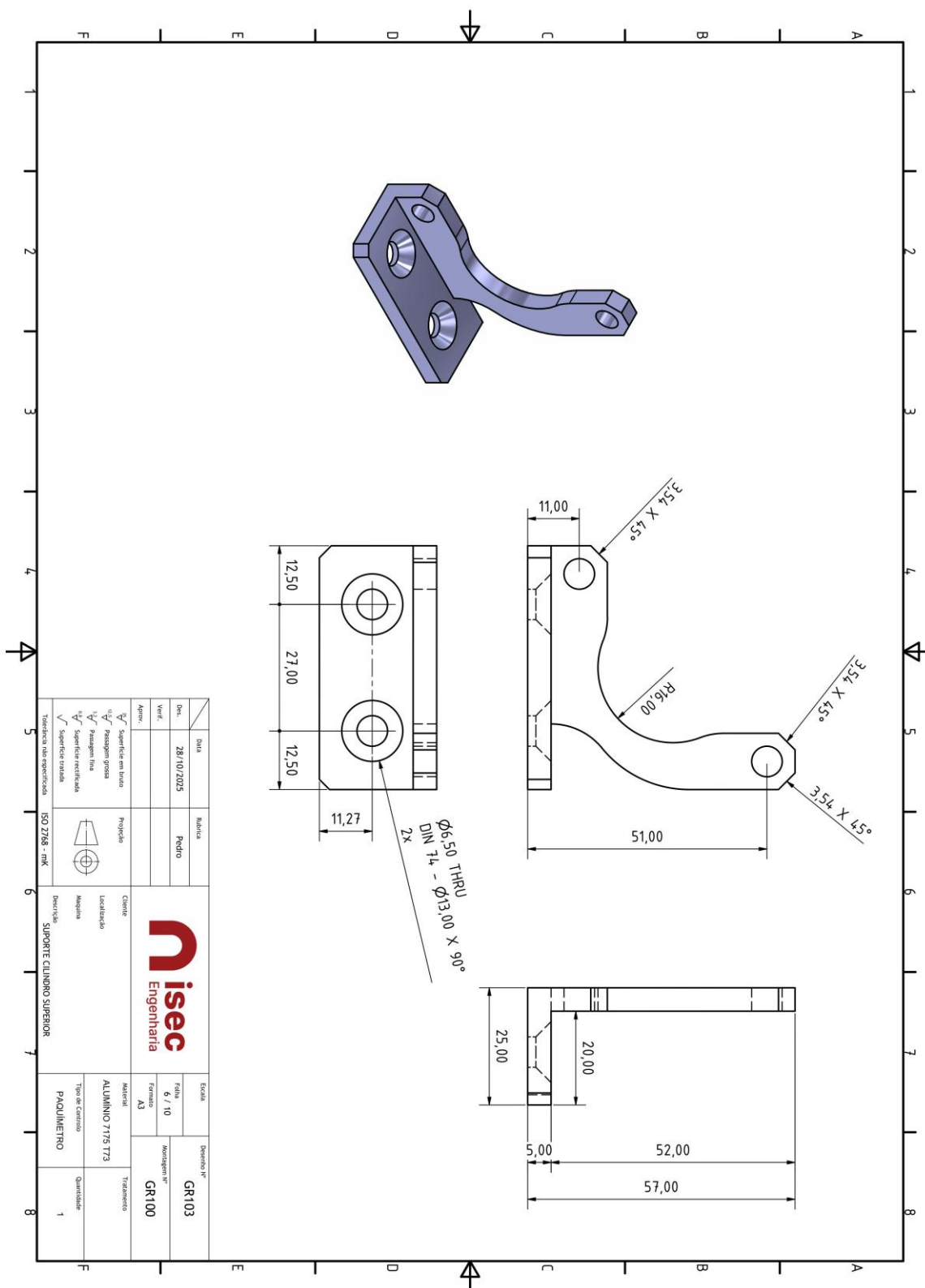
Anexo II – Desenho 2D - Base Fundo Garrafa



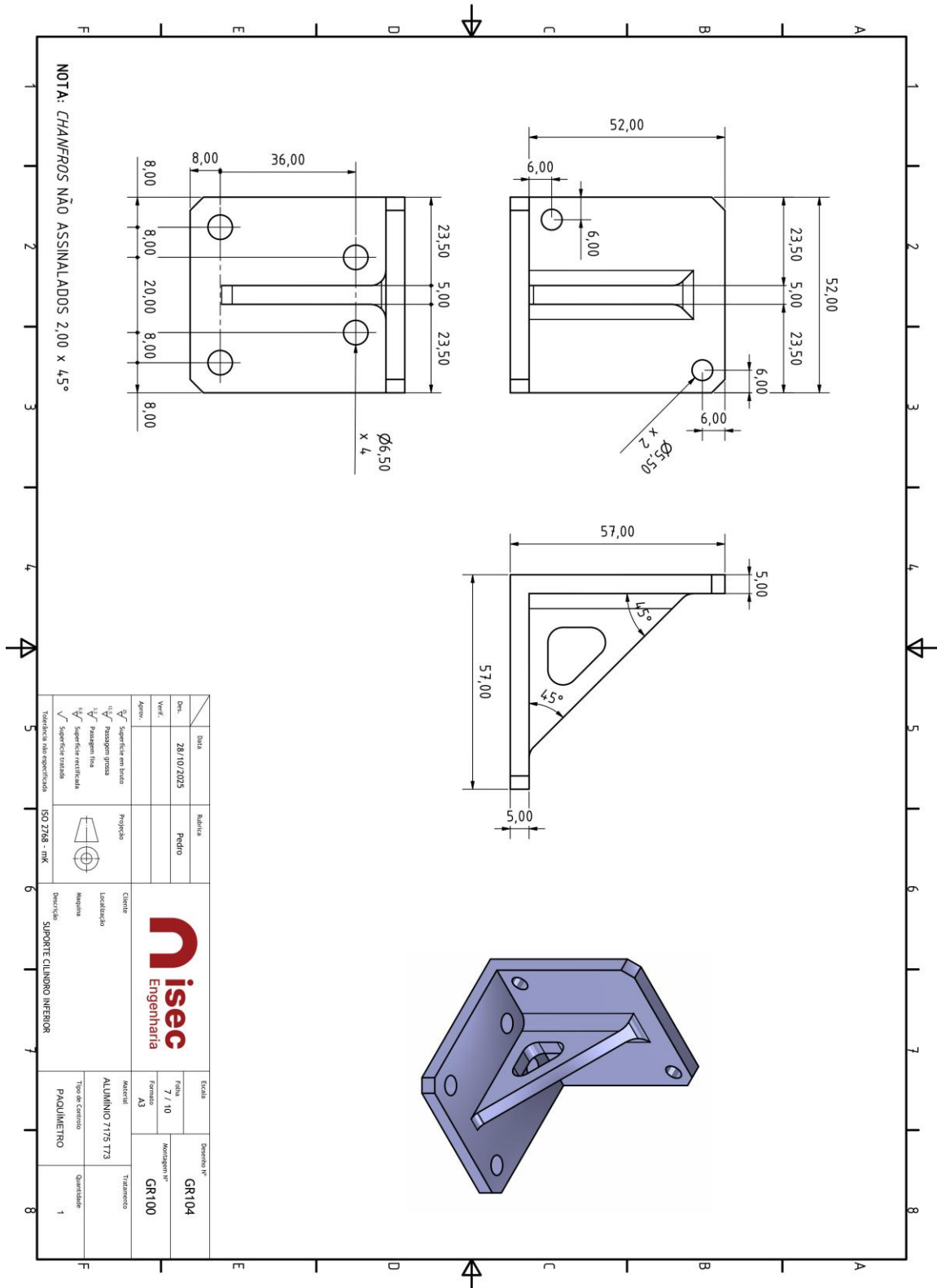
Anexo III – Desenho 2D – Casquilho Superior



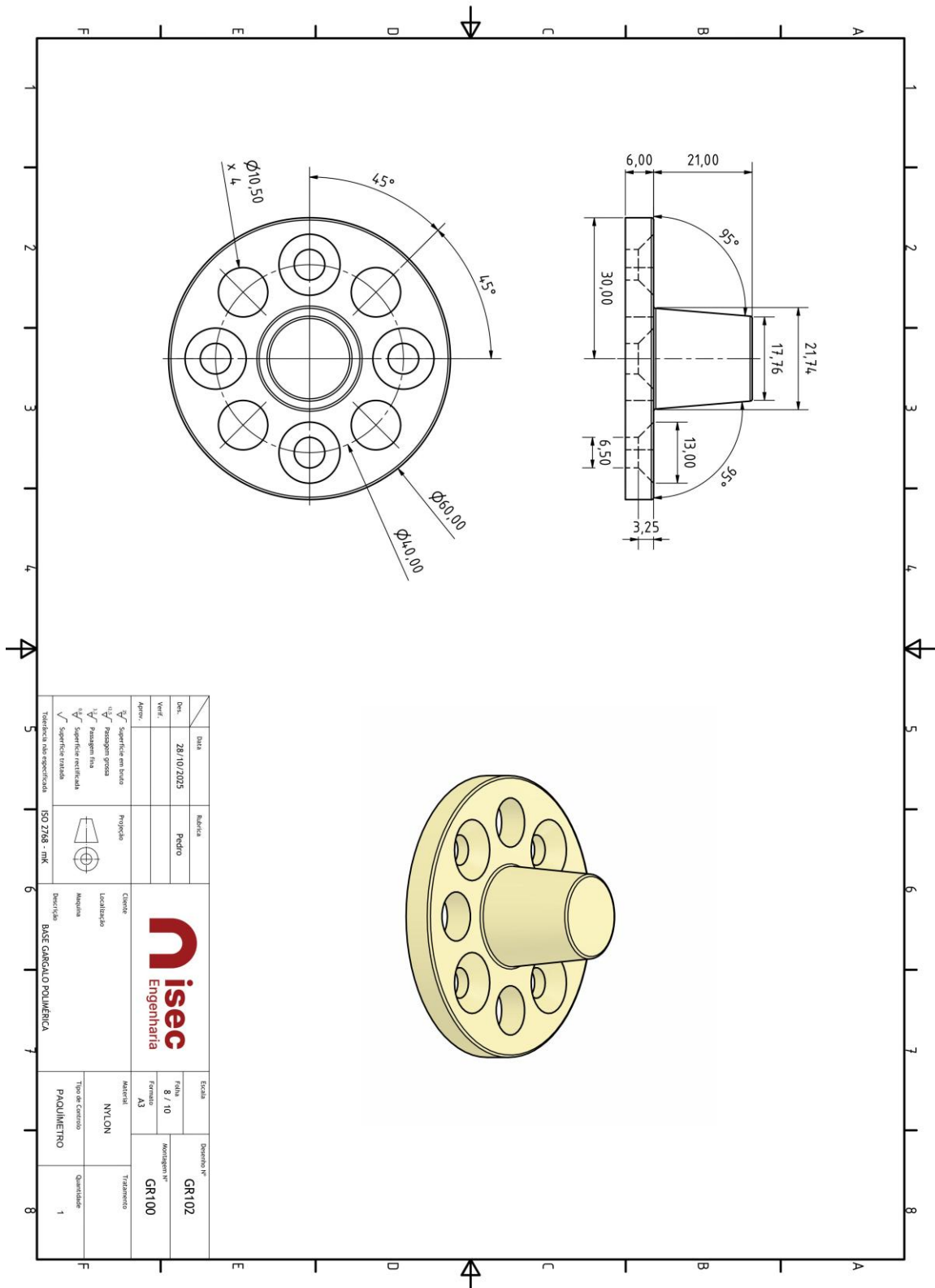
Anexo VI – Desenho 2D – Suporte Cilindro Superior



Anexo VII – Desenho 2D – Suporte Cilindro Inferior



Anexo IX – Desenho 2D – Base Gargalo Polimérica



Anexo XI – Código de programação do robô ABB (RAPID)

```
MODULE MainModule
  !Robtarget;
  CONST robtarget JGp1:=[[ -
286.11,994.26,1008.24],[0.193649,0.508874,0.632607,0.550776],[1,1,4,1],[9E+
09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp11:=[[ -
595.42,1160.74,836.96],[0.092033,0.489912,0.721777,0.480161],[1,1,4,1],[9E+
09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp21:=[[ -
731.14,1191.12,850.81],[0.123881,0.50404,0.688917,0.505955],[1,1,4,1],[9E+0
9,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp31:=[[ -
731.95,1201.38,860.73],[0.366647,0.169869,0.821437,0.402438],[1,1,3,1],[9E+
09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp41:=[[ -731.95,1201.37,860.72],[0.0289527,-0.704043,-
0.456013,-0.543634],[1,1,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp51:=[[ -
724.53,1184.79,852.58],[0.349232,0.116504,0.845643,0.386461],[1,1,-
5,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp61:=[[ -
554.22,1069.41,831.65],[0.123902,0.504771,0.692354,0.500501],[1,1,4,1],[9E+
09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget JGp71:=[[ -
271.05,313.48,1511.34],[0.70291,0.0479208,0.00554644,-0.709641],[1,-1,-
3,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

  !Task;
  PERS tasks tasklist1:["ola"];

  CONST dionum dioval1:=0;

  !speeddata-velocidades do robo;
  CONST speeddata VLIXAMENTO:=[20,25,1000,1000];

  PERS num controle:=2;
  PERS wobjdata
lixavertical:=[FALSE,TRUE,"lixavertical",[[0,0,0],[1,0,0,0]],[[0,0,0],[1,0,
0,0]]];

  !VAR;
  VAR num Bojo:=0;
  VAR num inc:=1;
  VAR dnum reg6:=0;
  VAR num reg7:=0;
  VAR taskid task1;
  VAR event_type event_type1:=0;
  VAR bool flag1:=FALSE;
  VAR accdata accdata1:=[0,0];
  VAR tasksatstart tasksatstart1:["",FALSE];
```

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

```
VAR num pCiclo:=0;
VAR num numPeca;
VAR num numRepete;

!TOOLDATA-iformacoes da minha ferramenta
TASK PERS tooldata
protoJG:=[TRUE, [[0,0,358],[1,0,0,0]], [9,[0,0,150],[1,0,0,0],0,0,0]];

!String-podem ser alteradas para as que eu quiser;
CONST string GarrafaLIXA="Lixar garrafa";
CONST string Repetir="Repetir lixagem";
CONST robtarget
pseg:=[[368.03,768.80,1450.64],[0.781614,0.184536,0.272019,0.530123],[0,0,-5,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget
JGp81:=[[240.43,634.95,1462.78],[0.348318,0.0574534,0.0689032,0.933074],[0,0,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget
JGp91:=[[449.09,1023.13,1438.59],[0.221634,0.417783,0.0650454,0.878695],[0,0,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget
JGp101:=[[792.11,1163.63,1479.73],[0.61738,0.0113826,0.0420768,0.785456],[0,0,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget
JGp111:=[[792.10,1163.63,1479.73],[0.617377,0.0113828,0.0420765,0.785459],[0,0,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget
JGp121:=[[792.11,1163.63,1479.73],[0.617381,0.0113827,0.042076,0.785456],[0,0,-4,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

PROC main()
  main:
  SetDO DO10_1,1;
  !PosInicialvinda;
  PosInicial;

  TPreadFK reg2,"Escolha o
programa!",GarrafaLIXA,Repetir,stEmpty,stEmpty,stEmpty;

  IF reg2=1 THEN
  lixagarrafaJG;
  PosInicialvinda;
  ENDIF

  IF reg2=2 THEN

  TPreadnum controlo,"Quantas vezes pretende realizar a operacao";

  IF controlo=0 THEN
  GOTO main;
  ENDIF

  IF controlo =1 THEN
```

João Pedro Rodrigues Gonçalves

```
        lixagarrafaJG;
        PosInicialvinda;
    ENDIF

    IF controlo >=2 THEN
        SetDO D010_1,0;
        MoveJ pseg, v1000, z50, protoJG;
        MoveJ JGp1, vmax, z50, protoJG;
            MoveJ JGp11, vmax, z50, protoJG;
            MoveJ JGp21, vmax, z50, protoJG;
            MoveJ JGp31, vmax, z50, protoJG;

        FOR i FROM 1 TO controlo DO
            lixarepeticao1;
            PosInicialvinda;
        ENDFOR
    ENDIF

ENDIF

ENDPROC

PROC lixarepeticao1()
    SetDO D010_1,0;

    !vai para perto da lixa vertical
    MoveJ JGp1, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp11, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp21, vmax, z50, protoJG;

    !lira fazer a repeticao quantas vezes for o controlo
    lixavertical.uframe.trans.z:=- (inc/10);
    MoveJ JGp31, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp41, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp51, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp61, vmax, z50, protoJG;
        MoveJ JGp71, v1000, z50, protoJG;
    inc:=inc+1;
    lixavertical.uframe.trans.z:=0;
ENDPROC

!programa para lixar a garrafa

PROC lixagarrafaJG()
    SetDO D010_1,0;
    MoveJ pseg, v1000, z50, protoJG;
    MoveJ JGp1, v1000, z50, protoJG;
```

Projeto e desenvolvimento de ferramenta para implementação em sistema robótico

```
MoveJ JGp11, v1000, z50, protoJG;  
MoveJ JGp21, v1000, z50, protoJG;  
MoveJ JGp31, VLIXAMENTO, z1, protoJG;  
MoveJ JGp41, VLIXAMENTO, z1, protoJG;  
MoveJ JGp21, vmax, z1, protoJG;  
MoveJ JGp31, VLIXAMENTO, z1, protoJG;  
MoveJ JGp41, VLIXAMENTO, z1, protoJG;  
MoveJ JGp51, vmax, z1, protoJG;  
!MoveJ JGp61, v1000, z50, protoJG;
```

```
ENDPROC
```

```
PROC PosInicial()  
MoveAbsJ [[56.2826,36.7283,-30.8072,1.67301,-91.212,-  
312.513],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs, v2500, z150,  
protoJG;  
ENDPROC
```

```
PROC PosInicialvinda()  
SetDO DO10_1,1;  
MoveJ JGp1, v1000, z50, protoJG;  
MoveJ pseg, v1000, z50, protoJG;  
MoveAbsJ [[56.2826,36.7283,-30.8072,1.67301,-91.212,-  
312.513],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs, v2500, z150,  
protoJG;  
ENDPROC
```

```
ENDMODULE
```




**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra