

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Proposta para Automatização de Equipamento de Corte 3D

Marco António Pereira Gonçalves

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. João Manuel R.S. Tavares

Orientador na empresa: Eng.º Carlos Furtado



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2019

Proposta para Automatização de Equipamento de Corte 3D

Marco António Pereira Gonçalves

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2019

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida em contexto empresarial na Quantal SA e teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução para a automatização de um equipamento de corte a laser 3D. A iniciativa de automatização do processo surgiu da necessidade de aumento da cadência de produção, através da eliminação ou minimização dos fatores que contribuem para a sua baixa produtividade.

Como primeiro passo no estabelecimento de uma possível solução, foi realizada uma análise do processo de fabrico, identificando as operações associadas e das causas da baixa produtividade. Posteriormente, foi proposta uma solução detalhada para a automatização a efetuar. Para a sua implementação são necessários três elementos fundamentais: um braço robótico, a garra que integra o braço robótico e transportadores para as peças a fabricar. Relativamente ao braço robótico, foi efetuada uma análise e seleção com base num modelo disponível nas instalações na empresa. Quanto à garra e transportadores, foi realizado o estudo e projeto à medida das necessidades do processo de fabrico, tendo-se ainda procedido à análise dos custos envolvidos.

Uma vez realizado o projeto dos elementos mencionados e selecionados os materiais necessários, foi possível determinar o custo total de aquisição da solução proposta e efetuar uma comparação entre a cadência de produção atual e a cadência estimada após a implementação, bem como o período de amortização esperado.

Apesar de se tratar de uma solução pensada para a automatização de um equipamento específico, a sua aplicabilidade pode facilmente ser estendida a outros equipamentos, dada a flexibilidade do sistema.

Palavras-chave: automatização; equipamento de corte a laser; projeto de garra; projeto de transportador; otimização de processo.

Abstract

This thesis was carried out in a business context at Quantal SA and its main goal was to develop a solution for the automatization of a 3D laser cutting machine. The automatization of the process had originated from the need to increase the throughput capacity by the elimination or reduction of the factors which lead to its low productivity.

The first step to establish a possible solution was an analysis of the manufacturing process, identifying the related tasks and the causes for low productivity. Then, a detailed solution was presented for the equipment automatization. For the implementation of the proposed solution, three essential elements are needed: a robotic arm, a gripper for the robotic arm and conveyors for the workpieces. Regardless to the robotic arm, an analysis and selection were made based on an available robot at the factory. Toward to the gripper and conveyors, it was made the study and design according the needs of the manufacturing process, taking into account the envolved costs.

After designing the mentioned elements and selected the required materials, it was possible to settle the total cost for the acquisition of the proposed solution. Then, it was made a comparison between the current and the estimated throughput capacity regarding the system implemetation, and the expected amortization period as well.

The proposed solution was thought for a specific laser cutting machine, however it can be easily applied to other cutting machines due to the system flexibility.

Keywords: automatization; laser cutting machine; gripper design; conveyor design; process optimization.

Agradecimentos

Apesar das dificuldades sentidas, a realização desta dissertação permitiu o meu desenvolvimento não só a nível profissional, como a nível pessoal. Assim, não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste projeto:

Ao Eng.º Carlos Furtado, orientador na empresa, por todo o apoio, conhecimentos e confiança transmitidos e a orientação nas dificuldades que foram surgindo no decorrer do trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Industrial e do Departamento de Engenharia, pelo acolhimento na equipa, aconselhamento e suporte prestados.

Ao meu orientador na FEUP, o professor João Manuel R.S. Tavares, pela disponibilidade e orientação ao longo deste projeto, assim como ao professor Marco Parente, pelo apoio na realização das simulações numéricas.

À minha namorada Margarida, pelo seu papel fundamental nos objetivos que tenho cumprido com sucesso, pelo seu carinho, paciência e encorajamento nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, especialmente ao Luís Ferreira, pela disponibilidade e apoio desde logo demonstrados.

A todos o meu muito obrigado.

Marco Gonçalves

*“Out of clutter, find Simplicity.
From discord, find Harmony.
In the middle of difficulty lies Opportunity.”*

Albert Einstein

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Quantal SA	1
1.3	Objetivos do projeto	3
1.4	Metodologia	4
1.5	Estrutura da Dissertação	4
2	Fundamentos teóricos	5
2.1	Operações <i>pick and place</i>	5
2.2	Robôs industriais	7
2.2.1	Braço mecânico	9
2.2.2	Sensores	11
2.2.3	Controlador e pendente de ensino	11
2.2.4	<i>End effectors</i>	12
2.3	Sistemas transportadores	23
2.3.1	Tipos de transportadores	24
2.3.2	Acionamento	26
2.3.3	Transportadores de corrente	26
3	Situação inicial e solução proposta	35
3.1	Equipamentos de corte a laser	35
3.1.1	Corte 2D	35
3.1.2	Corte 3D	37
3.2	Equipamento selecionado e análise do processo	40
3.2.1	Características do equipamento de corte	40
3.2.2	Peça em fabrico	41
3.2.3	Ciclo produtivo	42
3.2.4	Fatores que contribuem para a baixa produtividade	43
3.3	Solução proposta	44
3.3.1	Descrição e funcionamento	44
4	Desenvolvimento da solução proposta	49
4.1	Alterações ao programa de corte	49
4.1.1	Remoção do material excedente	49
4.1.2	Furação da peça	50
4.2	Braço robótico	50
4.2.1	Controlador	52
4.3	Garra	53

4.3.1	Seleção	53
4.3.2	Estrutura	53
4.3.3	Sistema de vácuo	57
4.3.4	Material selecionado e modelo final	62
4.4	Deteção da furação da peça	64
4.5	Transportadores	67
4.5.1	Seleção	67
4.5.2	Dimensionamento e seleção das correntes	67
4.5.3	Elementos de suporte das peças	69
4.5.4	Veio de transmissão e carretos	70
4.5.5	Chumaceiras	72
4.5.6	Motoredutor	72
4.5.7	Estrutura	73
4.5.8	Tensionamento das correntes	75
4.5.9	Material selecionado e modelo	76
4.6	Análise de custo da solução e amortização	77
4.6.1	Verificação dos furos da peça	78
4.6.2	Aquisição da solução	78
5	Conclusões e trabalho futuro	81
5.1	Trabalho futuro	82
A	Desenhos técnicos	83
	Referências	93

Lista de Figuras

1.1	Logótipo da Quantal SA.	2
1.2	Instalações da Quantal em Vila do Conde (Quantal, 2019).	2
1.3	Organograma da Quantal SA.	3
2.1	Fluxo de materiais nas operações <i>pick and place</i> (Wolf et al., 2005).	5
2.2	Tempo de máquina e tempo de manuseamento (Wolf et al., 2005).	6
2.3	Implementação anual de robôs industriais na Europa para operações de fabrico (Siciliano et al., 2009).	7
2.4	Comparação entre o braço humano e o braço robótico (Wang e Artemiadis, 2013).	8
2.5	Tipos de juntas de um braço robótico (Santos, 2004).	9
2.6	Tipos de estruturas cinemáticas (Siciliano et al., 2009).	10
2.7	Sistema de controlo tradicional (Santos, 2004).	12
2.8	Diferentes configurações para agarrar um objeto (Wolf et al., 2005).	14
2.9	Classificação dos elementos da garra quanto à flexibilidade (Wolf et al., 2005).	14
2.10	Exemplo de uma garra baseada no conceito ativo flexível (Wolf et al., 2005).	15
2.11	Tipos de ventosas (Bolmsjo, 2006).	16
2.12	Funcionamento das válvulas geradoras de vácuo de acordo com o princípio de Venturi (Schmalz, 2019a).	17
2.13	Geração de vácuo através de cilindros pneumáticos (Reddy e Eranki, 2016).	17
2.14	Etapas de dimensionamento de um sistema de vácuo (Festo, 2011).	17
2.15	Condição de carregamento no cenário 1 (Schmalz, 2019b).	19
2.16	Condição de carregamento no cenário 2 (Schmalz, 2019b).	19
2.17	Condição de carregamento no cenário 3 (Schmalz, 2019b).	19
2.18	Relação entre o nível de vácuo gerado e a energia consumida (Schmalz, 2019b).	20
2.19	Tempo de ciclo de um sistema de vácuo (adaptado de Festo (2011)).	21
2.20	Exemplo de uma garra magnética (Bernier, 2014).	22
2.21	Tochas de soldadura para os processos MIG e TIG.	23
2.22	Exemplos dos principais tipos de transportadores (mk T. G., 2019).	24
2.23	Local de montagem do atuador no transportador (mk T. G., 2019).	26
2.24	Acessórios de transporte para correntes (Renold, 2019).	27
2.25	Tensão acumulada ao longo da corrente transportadora (Renold, 2019).	27
2.26	Configuração A - corrente e material em deslizamento (Renold, 2019; ZMC, 2019).	29
2.27	Configuração B - rolamento da corrente e material transportado (Renold, 2019; ZMC, 2019).	29
2.28	Configuração C - corrente e material em deslizamento com declive (Renold, 2019; ZMC, 2019).	30
2.29	Configuração D - rolamento da corrente e material transportado com declive (Renold, 2019; ZMC, 2019).	30

2.30	Configuração E - material transportado verticalmente (Renold, 2019 ; ZMC, 2019).	31
2.31	Configuração recomendada para apoio da corrente e respetiva folga (Chains, 2018).	32
3.1	Trumpf Trumatic L3050.	35
3.2	Trumpf TruLaser 5030 Fiber.	36
3.3	Trumpf TruLaser 5030 classic.	37
3.4	Prima Power Laser Next LN 1530.	38
3.5	Prima Power Rapido.	38
3.6	Trumpf LaserCell 1005.	39
3.7	Trumpf TruLaser Cell 7020.	39
3.8	<i>Gabarit</i> para suporte da peça e grampos de fixação.	41
3.9	Área de segurança para rotação da mesa da máquina de corte (adaptado de Vina-machines (2014)).	41
3.10	Modelo CAD da peça em fabrico.	42
3.11	Esquema representativo da configuração proposta para a área de trabalho.	45
3.12	Esquema de funcionamento da solução proposta.	47
4.1	Peça produzida e respetivo material excedente antes da reprogramação do equipamento de corte.	50
4.2	Fanuc Arc Mate 120i B/10L.	51
4.3	Área de trabalho do braço robótico selecionado. (FANUC, 2002).	52
4.4	Controlador R-J3iB da Fanuc.	52
4.5	Superfície da extremidade do robô para montagem da garra (FANUC, 2002).	54
4.6	Configuração inicial da estrutura da garra.	54
4.7	Distribuição de tensões na estrutura inicial.	55
4.8	Deslocamento vertical na estrutura inicial.	55
4.9	Flange modelada para conexão da garra ao braço robótico.	56
4.10	Configuração final da estrutura da garra.	56
4.11	Distribuição de tensões na estrutura final.	57
4.12	Deslocamento vertical na estrutura final.	57
4.13	Demonstração dos componentes para o sistema de vácuo.	61
4.14	Modelo final da garra e posicionamento em relação à peça.	63
4.15	Acessórios de transporte da corrente selecionada (ZMC, 2019).	69
4.16	Modelo do componente para suporte das peças nos transportadores.	69
4.17	Dimensões do carreto selecionado (Rolisa, 2007).	70
4.18	Forças exercidas no veio e diagrama de momentos fletores.	71
4.19	Distribuição de flechas no veio.	71
4.20	Características da chumaceira selecionada para suporte dos veios (NTN, 2011).	72
4.21	Estrutura base do transportador.	73
4.22	Distribuição de tensões na estrutura do transportador.	74
4.23	Distribuição de flechas na estrutura do transportador.	74
4.24	Modelo do tensor de corrente desenvolvido.	75
4.25	Modelo do transportador de corrente desenvolvido.	78
A.1	Desenho de definição da flange modelada.	84
A.2	Desenho de definição da chapa base do suporte da peça.	85
A.3	Desenho de definição da chapa lateral do suporte da peça.	86
A.4	Desenho de definição do veio motor.	87
A.5	Desenho de definição do veio movido.	88

A.6	Desenho de definição do suporte da chumaceira.	89
A.7	Desenho de definição da chapa de proteção interior.	90
A.8	Desenho de definição do componente fixo do tensor.	91
A.9	Desenho de definição do componente móvel do tensor.	92

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros que influenciam as operações <i>pick and place</i> (Wolf et al., 2005).	6
2.2	Principais tipos de atuadores (Figueiredo, 2011)	8
2.3	Classificação das garras segundo o princípio de funcionamento (Wolf et al., 2005).	13
2.4	Valores de referência para o coeficiente de atrito (Festo, 2019).	18
2.5	Coeficiente de deslizamento C em função dos materiais em contacto e da lubrificação da superfície (ZMC, 2019).	28
2.6	Fator de serviço de acordo com diferentes condições de operação (Chains, 2018).	28
3.1	Especificações técnicas da Trumpf Trumatic L3050 (Kistner, 2015a).	36
3.2	Especificações técnicas da Trumpf TruLaser 5030 Fiber (Trumpf, 2019a).	36
3.3	Especificações técnicas da Trumpf TruLaser 5030 classic (Kistner, 2015b).	37
3.4	Especificações técnicas da Prima Power LN 1530 (Prima Power, 2017).	37
3.5	Especificações técnicas da Prima Power Rapido (Prima Power, 2017).	38
3.6	Especificações técnicas da Trumpf LaserCell 1005 (Kistner, 2015c).	39
3.7	Especificações técnicas da Trumpf TruLaser Cell 7020 (Trumpf, 2019b).	40
3.8	Dimensões e massa da peça em produção.	42
3.9	Tarefas realizadas pelo operador e tempo de ocupação.	43
4.1	Informações do robô ARC Mate 120i L (RobotWorx, 2019a).	51
4.2	Informações do robô ARC Mate 120i B/10L (RobotWorx, 2019b).	51
4.3	Dimensões e massa dos planificados já produzidos.	56
4.4	Requisitos e características assumidas para dimensionamento do sistema de vácuo.	58
4.5	Dimensões e características das ventosas de 1,5 foles disponíveis (Festo, 2015).	59
4.6	Características dos suportes selecionados para as ventosas (Festo, 2015).	59
4.7	Volume a evacuar e tempo de ciclo do sistema de vácuo.	60
4.8	Consumo de ar comprimido das geradoras e custos associados.	61
4.9	Materiais selecionados para a estrutura da garra.	62
4.10	Alternativa A para os materiais do sistema de vácuo da garra.	63
4.11	Alternativa B para os materiais do sistema de vácuo da garra.	64
4.12	Alternativa A para os materiais para a verificação dos furos da peça.	66
4.13	Alternativa B para os materiais para a verificação dos furos da peça.	66
4.14	Valores definidos na fase preliminar de cálculo.	68
4.15	Características da corrente transportadora selecionada (ZMC, 2019).	68
4.16	Determinação da pressão exercida nos rolos da corrente.	69
4.17	Dimensões do carrinho selecionado (Rolisa, 2007).	70
4.18	CrITÉrios adotados para o dimensionamento do veio (Malça, 2019).	71
4.19	Características da chumaceira selecionada para suporte dos veios (NTN, 2011).	72
4.20	Requisitos definidos para a seleção do motorreductor.	73

4.21 Principais características do motoredutor selecionado (NORD, 2019).	73
4.22 Materiais selecionados para a estrutura do transportador.	76
4.23 Materiais selecionados para integração na estrutura do transportador.	77
4.24 Implementação da verificação dos furos e amortização.	78
4.25 Custo total dos componentes para construção da garra do braço robótico e dos transportadores.	79
4.26 Capacidade de produção do processo atual e do processo automatizado.	79

Abreviaturas e Símbolos

2D	duas dimensões
3D	três dimensões
GDL	graus de liberdade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
NBR	<i>acrylonitrile butadiene rubber</i>
FPM	<i>fluorine rubber</i>
MIG	<i>metal inert gas</i>
TIG	<i>tungsten inert gas</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engeneering</i>
F_{TR}	força teórica de retenção, N
S	fator de segurança
μ	coeficiente de atrito
m	massa a elevar, kg
g	aceleração da gravidade, $m \cdot s^{-2}$
a	aceleração do sistema, $m \cdot s^{-2}$
F_a	força de aceleração, N
F_S	força de sucção, N
t_E	tempo de evacuação, s
t_S	tempo de descarga, s
t_1	tempo de transporte, s
t_2	tempo de retorno, s
T_C	tempo de ciclo, s
T	força aplicada na corrente, N
P_1	massa do material a transportar, kg
P	massa total da corrente, kg
N	número de correntes
f_1	coeficiente de atrito devido ao deslizamento da corrente
f_2	coeficiente de atrito devido ao deslizamento e ao rolamento
d	diâmetro exterior da bucha, mm
D	diâmetro exterior do rolo, mm
b	coeficiente de superfície
C	coeficiente de deslizamento
F_S	fator de serviço
F_A	coeficiente de atrito nas rodas dentadas

τ_{adm}	tensão de corte admissível, MPa
M_F	momento fletor, $N \cdot mm$
M_T	momento torsor, $N \cdot mm$
K_F	fator de choque e fadiga por torsão
K_T	fator de choque e fadiga por flexão
σ_c	tensão de cedência, MPa
σ_r	tensão de rotura, MPa
θ	deformação angular, $^{\circ} \cdot mm^{-1}$
G	módulo de elasticidade transversal, MPa

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar o enquadramento e motivação do projeto, bem como a empresa onde este foi desenvolvido. São também abordados os objetivos definidos, a metodologia adotada, assim como a estruturação do presente documento.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Esta Dissertação enquadra-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de Produção, Conceção e Fabrico. O projeto foi realizado em contexto de empresa, na Quantal SA, tendo sido iniciado no mês de Fevereiro e desenvolvido até ao final do mês de Junho.

O principal objetivo consistiu no estudo e desenvolvimento de uma solução para o aumento da cadência de produção de um dos equipamentos de corte a laser. O equipamento em questão possui elevado potencial de produção, contudo este encontra-se subaproveitado devido a diferentes fatores que contribuem para a sua baixa produtividade.

A solução estudada passou assim pela automatização do processo, através da alimentação e recolha automática das peças, conferindo autonomia ao processo. Desta forma, torna-se possível eliminar operações manuais e evitar as paragens do equipamento.

A otimização do processo irá aumentar a capacidade de produção e assim contribuir para uma melhor capacidade de resposta às necessidades de mercado.

1.2 Quantal SA

A Quantal SA (Figura 1.1), fundada em 1995, foi a primeira empresa em Portugal a apostar no desenvolvimento de aplicações industriais utilizando a tecnologia laser.

A sua atividade foca-se na conformação de chapa metálica e na produção, em série e de protótipos, para o setor automóvel.

A empresa está integrada no grupo Quantal Group, o qual é constituído por três outras empresas:



Figura 1.1: Logótipo da Quantal SA.

- **FORMSTAMPA:** Fundada em 2001, é uma empresa experiente no setor dos acabamentos, portas de segurança, construção e arquitetura;
- **ESPAM:** Fundada em 2007, a atividade da empresa centra-se na estampagem de peças metálicas para o mercado automóvel, construção civil e mobiliário;
- **GROWSTAMP:** Fundada em 2011, trata-se de uma empresa especializada na produção e comercialização de ferramentas progressivas.

Em 2007 foram inauguradas as novas instalações do grupo em Rio Mau, Vila do Conde, permitindo duplicar o chão de fábrica para 6000 m² (Figura 1.2).



Figura 1.2: Instalações da Quantal em Vila do Conde (Quantal, 2019).

Atualmente, o grupo possui cerca de 300 colaboradores e exporta grande parte da sua produção para países como Espanha, França, Alemanha e Suíça.

No que respeita à estrutura organizacional, a empresa encontra-se composta pelos departamentos apresentados na Figura 1.3. O estágio foi realizado no Departamento de Engenharia Industrial e no Departamento de Engenharia.

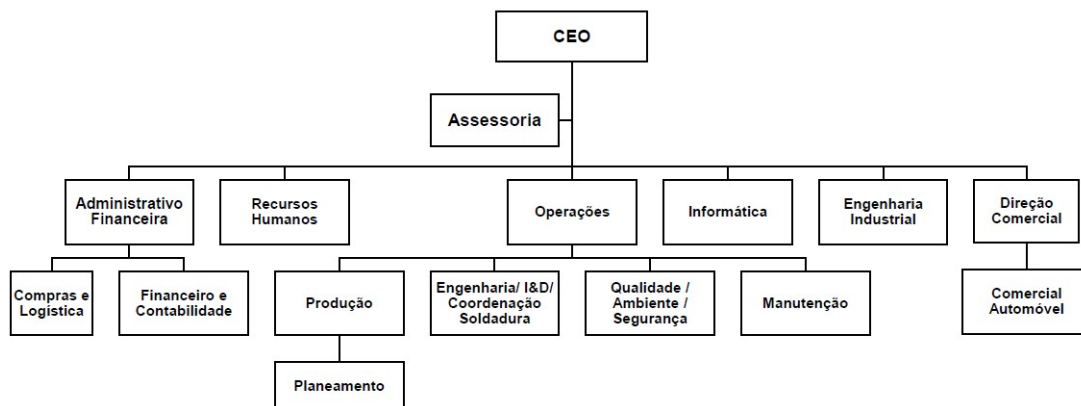


Figura 1.3: Organograma da Quantal SA.

Quanto ao processo produtivo, podem encontrar-se os seguintes processos de fabrico:

- Corte a laser 2D e 3D;
- Eletroerosão;
- Estampagem;
- Maquinagem;
- Quinagem;
- Soldadura;
- Montagem;
- Pintura.

1.3 Objetivos do projeto

Esta dissertação centrou-se no estudo e desenvolvimento de uma solução à medida, que permita aumentar a produtividade de um processo de corte a laser, efetuando a carga e descarga das peças de trabalho, e que possua uma autonomia significativa. Para tal, é necessário que o sistema auxiliar ao processo possua um braço robótico e transportadores para assegurar o fluxo das peças. O braço robótico tem a função de colocar e retirar as peças da máquina de corte. Por outro lado, os transportadores definem a autonomia do processo e permitem que o operador, periodicamente, realize o abastecimento e recolha das peças.

Para este projeto foram inicialmente definidos os seguintes objetivos:

- Análise do processo e identificação dos fatores que contribuem para a baixa produtividade;
- Propor uma solução para automatização do processo;
- Estudo e desenvolvimento de uma garra para o braço robótico;
- Estudo e desenvolvimento dos transportadores;
- Análise de custos e período de amortização;
- Implementação da solução desenvolvida.

1.4 Metodologia

Para o desenvolvimento de uma solução que permitisse o aumento da cadência de produção, foi necessário primeiro efetuar uma análise do processo e compreender as suas limitações e potencialidades. De um modo geral, a abordagem ao projeto desenvolvido passou pelas seguintes fases:

1. Análise dos equipamentos de corte a laser;
2. Análise do processo de fabrico;
3. Estudo e pesquisa das diferentes tecnologias a utilizar na solução a propor;
4. Desenvolvimento de solução;
5. Contacto com possíveis empresas fornecedoras;
6. Análise de custos.

1.5 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais quatro capítulos.

No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados com o projeto desenvolvido. É realizada uma revisão sobre braços robóticos e suas variantes, assim como dos tipos de garra mais adequados para operações de *pick and place*. Numa segunda parte do capítulo são introduzidos os diferentes tipos de transportadores e analisados os principais parâmetros para o dimensionamento de transportadores de corrente.

No Capítulo 3 é apresentada uma breve análise dos equipamentos de corte a laser existentes na empresa, seguindo-se um enquadramento do processo de fabrico e das características do equipamento selecionado. Por fim, são apresentados os fatores responsáveis pela baixa produtividade, bem como uma descrição detalhada da solução proposta.

No Capítulo 4 integra-se todo o estudo e fase de projeto da garra para o braço robótico e dos transportadores, sendo também abordado o braço robótico selecionado.

O Capítulo 5 representa uma síntese das principais conclusões obtidas com base projeto realizado. São ainda abordadas questões relacionadas com o trabalho futuro.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Operações *pick and place*

A execução de operações *pick and place* têm como objetivo o transporte de um objeto a partir de uma dada posição inicial para uma posição final desejada. As operações devem ser realizadas de forma segura e rápida, de forma a reduzir o tempo de ciclo do processo.

Na Figura 2.1 pode observar-se o fluxo de materiais típico nas operações *pick and place*.

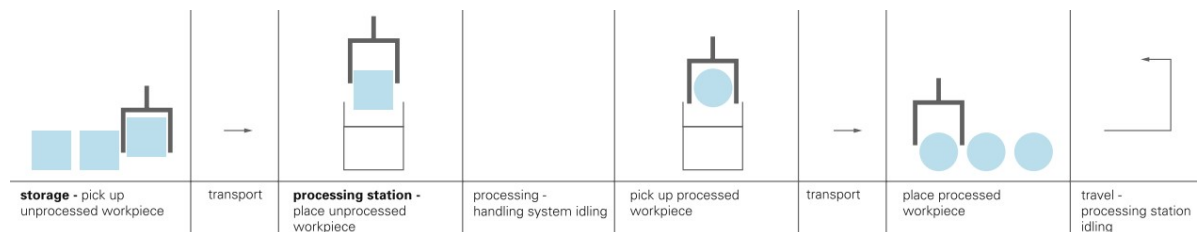


Figura 2.1: Fluxo de materiais nas operações *pick and place* (Wolf et al., 2005).

Do ponto de vista da produção, o processo de movimentação de materiais, por si só não acrescenta valor ao produto final, representando um aspeto secundário ao processo de fabrico. Desta forma, o tempo de produção pode dividir-se entre o tempo de máquina e o tempo de manuseamento (*handling time*), como se pode observar na Figura 2.2.

O tempo de máquina pode ser visto como o tempo durante o qual uma máquina opera, efetuando alterações à peça de trabalho. Já o tempo de manuseamento representa o tempo auxiliar do processo e pode ser dividido em pequenas tarefas, necessárias para a movimentação da peça ao longo do processo. Um planeamento adequado da produção implica a sincronização do tempo de máquina e do tempo de manuseamento. Procura-se que os equipamentos de fabrico funcionem continuamente ou, pelo menos reduzir o tempo de paragem dos mesmos, de modo a obter o máximo fluxo de produção (Wolf et al., 2005).

Dependendo das condições do espaço de trabalho e da complexidade da peça, tarefas aparentemente simples podem traduzir-se num processo complexo, com diferentes operações de manipulação. Problemas técnicos e económicos inesperados tendem a ocorrer em projetos de automação,

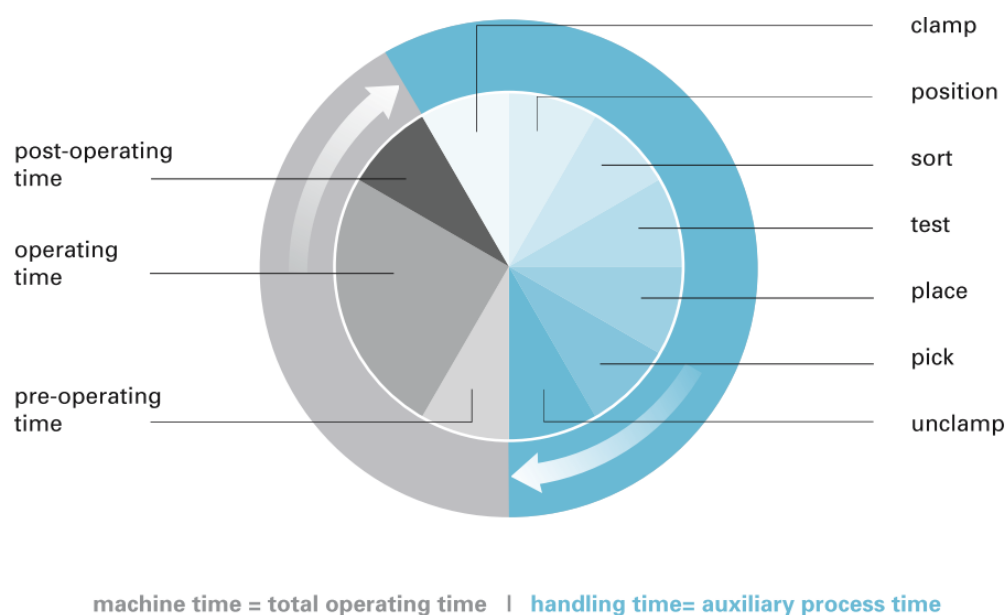


Figura 2.2: Tempo de máquina e tempo de manuseamento (Wolf et al., 2005).

especialmente quando o processo e respetivos parâmetros não são avaliados adequadamente numa fase inicial.

Independentemente do mecanismo utilizado, a manipulação de um objeto é influenciada por diferentes fatores. As condições do espaço de trabalho representam um fator importante para a seleção do mecanismo que agarra o objeto. Estas condições podem incluir potenciais riscos como temperaturas extremas ou humidade. Contudo, as condições de produção como o número de turnos de trabalho, limpeza e higiene também devem ser consideradas. O princípio do mecanismo deve também ser baseado nas características geométricas e físicas do objeto. Por outro lado, o estado inicial e final do objeto, nomeadamente a posição e orientação, interferem na escolha do mecanismo. A Tabela 2.1 apresenta alguns dos aspetos que influenciam uma operação *pick and place*.

Tabela 2.1: Parâmetros que influenciam as operações *pick and place* (Wolf et al., 2005).

Condições do espaço de trabalho	Características do objeto	Estado do objeto durante as operações <i>pick and place</i>
eficiência económica segurança instalação temperatura fonte de energia limpeza higiene manutenção substâncias desconhecidas variedade de objetos monitorização	geometria dimensões tolerância massa centro de gravidade superfície material consistência comportamento	posição orientação tolerância definida acessibilidade

Devido à elevada repetibilidade e simplicidade de execução, estas operações são cada vez mais realizadas com recurso a sistemas robóticos (Birglen e Schlicht, 2018). Na Figura 2.3 pode verificar-se o número de robôs implementados na Europa em diversas operações, destacando-se as operações de manipulação de materiais, com o dobro dos robôs implementados em operações de soldadura.

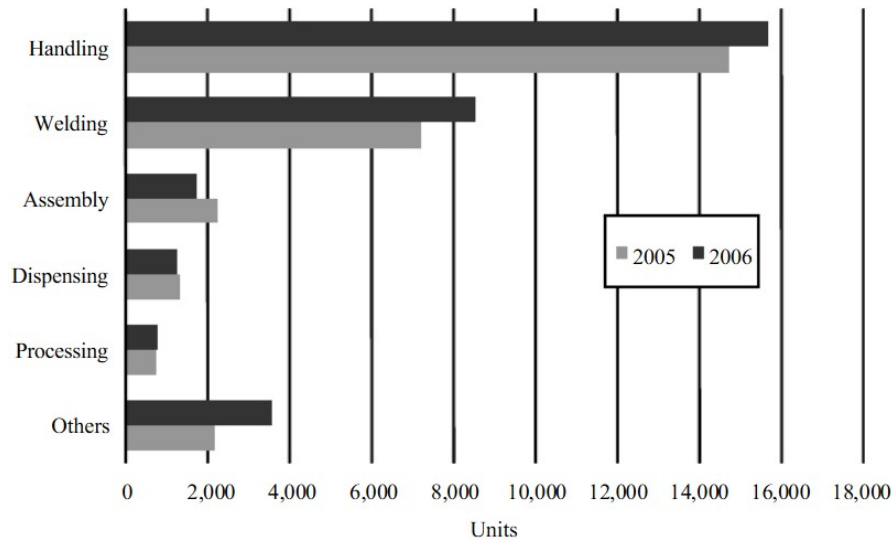


Figura 2.3: Implementação anual de robôs industriais na Europa para operações de fabrico (Siciliano et al., 2009).

2.2 Robôs industriais

Com o crescente aumento da atividade industrial nas últimas décadas, a utilização de robôs nas instalações produtivas é cada vez mais comum. A sua fácil programação aliada ao decréscimo no seu custo têm sido fatores determinantes. A utilização de robôs permite realizar uma grande diversidade de tarefas, evitando a intervenção humana para efetuar tarefas inseguras, perigosas, de elevada repetibilidade ou desagradáveis.

Diversos conceitos para caracterizar um robô têm sido estabelecidos. Segundo o *The Robot Institute of America*, em 1979, um robô industrial é:

“Um manipulador multifuncional, reprogramável, projetado para mover materiais, componentes, ferramentas ou dispositivos especiais através de movimentos programáveis variáveis para a execução de uma variedade de tarefas.”

Ou, segundo a norma ISO 8373, em 2012:

“Um mecanismo atuado, programável, geralmente resultante de uma série de segmentos articulados ou deslizantes em relação ao outro, com o propósito de agarrar e/ou movimentar objetos (peças ou ferramentas) usualmente com diversos graus de

liberdade. Pode ser controlado por um operador, bem como possuir autonomia suficiente para realizar tarefas sem intervenção humana.”

Os robôs manipuladores industriais baseiam-se na estrutura do braço humano para a realização de tarefas. Como se pode observar na Figura 2.4, as juntas são designadas como ombro (*shoulder*), cotovelo (*elbow*) e pulso (*wrist*).

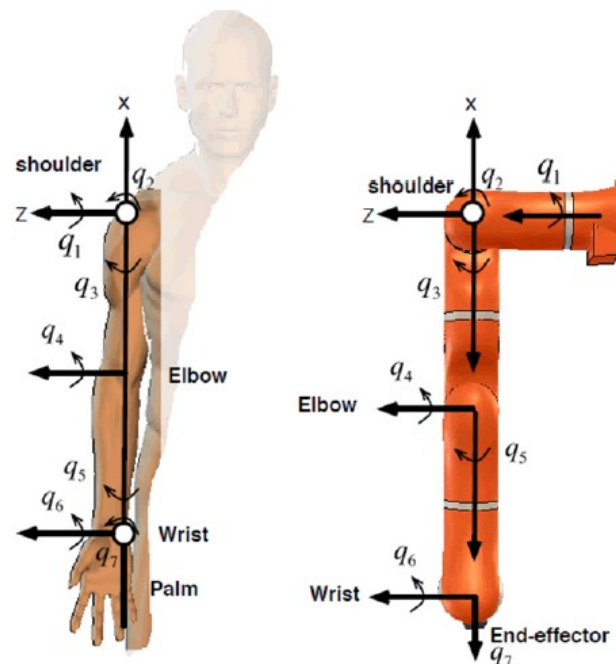


Figura 2.4: Comparação entre o braço humano e o braço robótico (Wang e Artemiadis, 2013).

O movimento das articulações do robô é realizado através de atuadores, cuja fonte de alimentação pode ser essencialmente pneumática, hidráulica ou elétrica. Na Tabela 2.2 apresenta-se uma comparação entre os tipos de atuadores (Figueiredo, 2011).

Tabela 2.2: Principais tipos de atuadores (Figueiredo, 2011)

Tipo de atuador	Vantagens	Desvantagens
Pneumático	Baixo custo Fácil manutenção Fácil utilização	Maior dificuldade de controlo Sistema ineficiente Ruído do compressor
Hidráulico	Cargas elevadas Fácil utilização Elevada resistência	Sistema lento Sistema ineficiente Elevada manutenção
Servomotor	Alto desempenho Compacto Altas velocidades	Custo elevado Limitado pelos controladores Velocidade limitada pela eletrónica
Passo	Controlo simples Carga constante Posição precisa	Não pode variar a carga Não pode perder passos Problemas de ressonância

Para a realização de uma determinada tarefa, devem ser consideradas as características do robô, entre as quais (Dias, 1993):

- **Espaço de trabalho (*workspace*):** forma e volume da envolvente em que o robô opera, tendo em conta os movimentos possíveis com as suas articulações;
- **Orientação do *end effector*:** devido às restrições das articulações, o tipo *end effector* define o espaço de trabalho alcançável;
- **Carga máxima (*payload*):** peso máximo que o robô é capaz de elevar nas condições ideais;
- **Repetibilidade:** capacidade do robô em realizar repetidamente e consistentemente o mesmo movimento e atingir uma determinada posição;
- **Precisão:** representa a diferença ou erro entre a tarefa requerida e a tarefa realmente obtida pelo robô;
- **Amplitude de movimento:** intervalo de rotação possível de cada eixo do robô;
- **Velocidade:** rapidez com que o robô se consegue movimentar (velocidade de rotação de cada eixo). Para uma determinada aplicação, é necessário que este parâmetro seja considerado, de modo que o robô realize todas as operações dentro do tempo de ciclo.

Para além do braço robótico, um sistema robótico necessita ainda de um *end effector*, sensores, controlador, pendente de ensino e fonte de alimentação.

2.2.1 Braço mecânico

Essencialmente podem encontrar-se dois tipos de juntas num braço robótico, como representado na Figura 2.5. As rotacionais, que se caracterizam por coordenadas angulares e as prismáticas, em que existe translação. Um outro tipo de junta pode ser encontrado, nomeadamente a esférica, que é resultante da combinação de três juntas rotacionais (Dias, 1993).

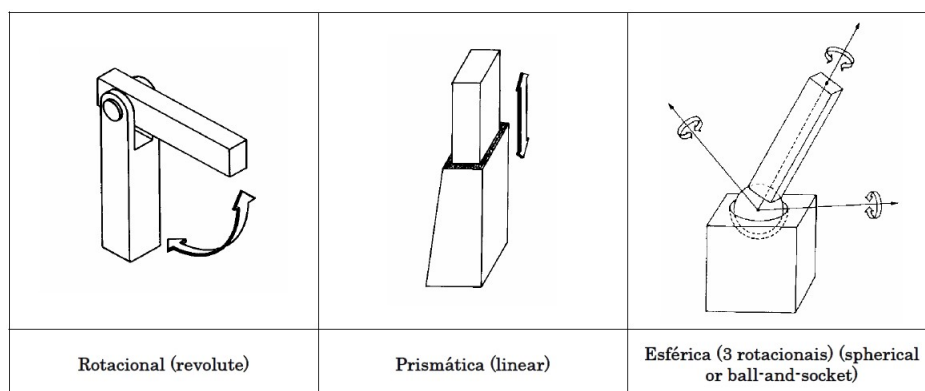


Figura 2.5: Tipos de juntas de um braço robótico (Santos, 2004).

Os movimentos independentes que um robô manipulador consegue realizar, representam o número de graus de liberdade que possui. O número de articulações é definido como graus de mobilidade e não corresponde necessariamente ao número de graus de liberdade.

Quanto ao volume e forma do espaço de trabalho, para além de depender do *end effector*, depende também da estrutura do braço robótico e das limitações das suas articulações. Existem cinco tipos de estruturas cinemáticas (Figura 2.6):

- **Cartesiana:** constituída por três juntas prismáticas, criando um espaço de trabalho em forma de paralelepípedo. O robô é montado num pórtico ou carril, movendo-se segundo os eixos x, y e z . Esta estrutura permite mover objetos de grandes dimensões e pesados devido à rigidez do suporte do robô;
- **Cilíndrica:** para além de duas juntas prismáticas possui uma junta rotacional, formando um espaço de trabalho cilíndrico. Se a tarefa a realizar é definida em coordenadas cilíndricas, cada grau de liberdade corresponde a uma variável cartesiana; Utilizadas na manipulação de objetos de grandes dimensões;
- **Esférica:** possui duas juntas rotacionais e uma prismática, obtendo-se um espaço de trabalho esférico. Possui menor rigidez mecânica que as estruturas anteriores e a sua construção é mais complexa;
- **SCARA** (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*): combinação de duas juntas rotacionais e uma prismática, de forma a que os respetivos eixos sejam paralelos. Esta estrutura possui grande capacidade para a movimentação de cargas verticais. Adequa-se à manipulação de pequenos objetos;
- **Antropomórfico:** utiliza três juntas rotacionais, obtendo-se um espaço de trabalho de volume relativamente elevado. Este tipo de configuração é o que apresenta maior semelhança com o braço humano, sendo amplamente utilizado na indústria. Neste caso, a precisão do posicionamento do pulso no interior do espaço de trabalho é variável.

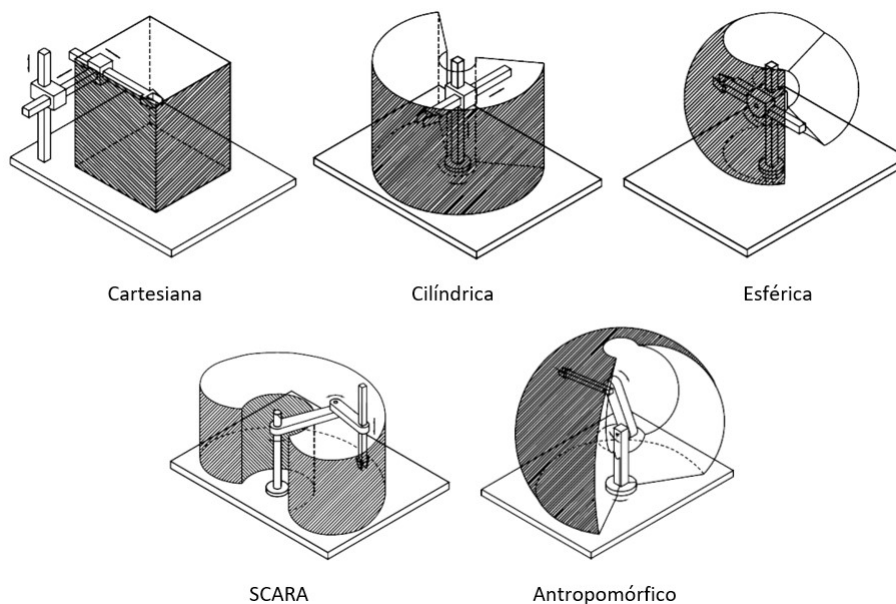


Figura 2.6: Tipos de estruturas cinemáticas (Siciliano et al., 2009).

2.2.2 Sensores

Os sensores têm a função de obter informação sobre a envolvente onde se encontram, transmitindo essas informações ao controlador, informando-o do estado das operações. A utilização de sensores facilita a realização de determinadas tarefas que envolvem o contacto, como é o caso das operações *pick and place*, melhorando o nível de autonomia do sistema.

Os sensores podem ser classificados em internos ou externos. De forma a garantir o movimento coordenado da estrutura mecânica do manipulador, são utilizados os sensores internos que monitorizam o estado interno do manipulador (Siciliano et al., 2009):

- **Sensores de posição:** fornecem um sinal elétrico proporcional ao deslocamento linear ou angular em relação a uma posição de referência. Os sensores de deslocamento angular são particularmente utilizados em braços robóticos, sendo os *encoders* e os *resolvers* os mais utilizados devido à sua precisão, robustez e confiabilidade;
- **Sensores de velocidade:** são implementados em numerosas aplicações e são denominados tacómetros (*tachometers*). Os tacómetros mais comuns são os de corrente contínua (DC) e os de corrente alternada (AC);

Por outro lado, os sensores externos permitem informar o robô sobre o estado do meio envolvente. Os mais comuns são:

- **Sensores táteis:** permitem detetar a presença ou ausência de um objeto através do contacto. Incluem-se os sensores de força, os quais permitem medir a força através do deslocamento aplicado num elemento extensível;
- **Sensores de proximidade:** detetam quando um objeto entra na zona de ação do sensor, não existindo contacto. São exemplos os sensores indutivos e os capacitivos;
- **Sensores pneumáticos:** atuam através de jatos de ar, que detetam a presença quando intercetados;
- **Sensores óticos:** detetam a presença quando um feixe de radiação é interrompido;
- **Sensores de visão:** utilizam uma câmara para medir a intensidade da luz refletida por um objeto, reconhecendo a sua forma. Os dispositivos mais utilizados são os sensores CCD (Charge Coupled Device) e os CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), baseados no efeito fotoelétrico dos semicondutores.

2.2.3 Controlador e pendente de ensino

O controlador representa o centro de convergência e distribuição de toda a informação do sistema. Este tem a função de controlar os movimentos do braço robótico e as operações no espaço de trabalho. Através da informação recebida pelo circuito de sensores, o controlador, com base nos programas armazenados em memória, envia novas ordens à unidade de potência, que por

sua vez fornece a energia necessária aos atuadores do robô. A unidade de potência poderá estar integrada no controlador ou separada do mesmo. Na Figura 2.7 está representado um esquema típico de um sistema de controlo.

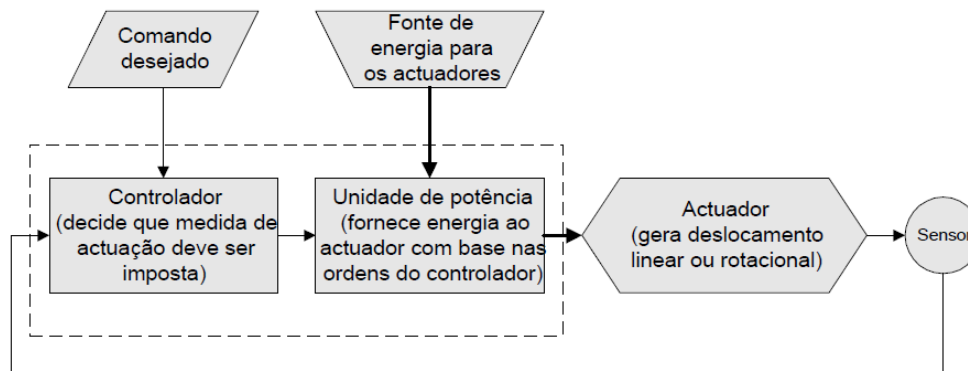


Figura 2.7: Sistema de controlo tradicional (Santos, 2004).

O controlador pode ainda fazer parte de um sistema para interligação com o utilizador, por exemplo através de um computador, existindo comunicação entre os dispositivos. Neste caso, a programação das operações para o controlador é facilitada devido à variedade de ferramentas disponíveis. Em alternativa, a sequência de operações do ciclo e os intervalos de tempo entre operações podem também ser estabelecidos através de um dispositivo programável, designado pendente de ensino (*teach pendant*), em que a programação é realizada ponto a ponto. Este dispositivo permite mover as juntas do robô para cada um dos pontos desejados do espaço de trabalho, memorizando os pontos para posterior operação. O pendente encontra-se conectado ao controlador, possuindo teclas e um *display* para o controlo dos movimentos, e ainda um botão de paragem para situações de emergência (Groover et al., 1986).

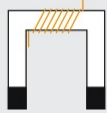
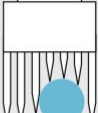
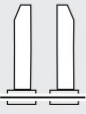
2.2.4 End effectors

O *end effector* representa o elemento ligado à extremidade (pulso) do braço robótico que realiza o contacto com o meio envolvente, permitindo realizar as tarefas pretendidas. Genericamente, estes dispositivos podem ser divididos em duas categorias:

- **Garra (*gripper*)**: utilizada para a manipulação de objetos. As garras de aperto mecânico (pinças) são as mais comuns, no entanto, também podem ser de aperto magnético, por vácuo, por adesivo, entre outros (Tabela 2.3);
- **Ferramenta (*tool*)**: permite realizar operações de fabrico. Existe uma grande variedade de ferramentas disponíveis, as principais incluem a soldadura, pintura, corte, rebarbagem, polimento, entre outras.

Devido à diversidade de objetos que um sistema robótico pode ter de movimentar, existe uma vasta gama de garras comercialmente disponíveis em diferentes formas e tamanhos.

Tabela 2.3: Classificação das garras segundo o princípio de funcionamento (Wolf et al., 2005).

mechanical grippers		suction grippers	magnetic grippers	adhesive grippers	mold grippers	nail grippers
scissors gripper	fork gripper		electromagnet	adhesive foil		
						
parallel jaw gripper	three-point gripper		permanent magnet			
						

De modo a compreender o tipo de garra mais adequado para uma determinada operação *pick and place*, de seguida é apresentada uma descrição das técnicas mais utilizadas. Quanto às ferramentas, posteriormente serão ainda abordadas as ferramentas utilizadas em operações de soldadura por arco elétrico.

2.2.4.1 Garras de preensão mecânica

Uma garra mecânica é um tipo de *end effector* que utiliza dedos mecânicos atuados por um mecanismo para agarrar um objeto. Os dedos mecânicos são também chamados de pinças ou mandíbulas. A energia necessária para o acionamento da garra pode ser hidráulica, pneumática ou elétrica (Singh e Joshi, 2006). Diferentes configurações de dedos mecânicos podem ser usadas, dependendo da geometria do objeto a agarrar.

Geralmente, os elementos das garras são revestidos com um material macio, capaz de aumentar o atrito entre as superfícies do objeto e do dedo mecânico e evitando que o objeto seja danificado. O contacto entre as superfícies pode ainda ser melhorado através do aumento da área de contacto. Desta forma, um bom contacto entre as garras e o objeto permite um manuseamento seguro, com o mínimo de força aplicada (Wolf et al., 2005).

A quantidade de força a aplicar pela garra depende da massa do objeto, do coeficiente de atrito e da sua geometria. Para objetos facilmente deformáveis é conveniente determinar a pressão máxima aplicável.

Os elementos da garra podem estar alinhados em relação ao objeto de diferentes formas. As opções mais comuns são (Figura 2.8):

- **Aperto externo:** a força das garras é aplicada na superfície exterior do objeto;
- **Aperto intermédio:** o objeto, por exemplo com forma tubular, é agarrado pela superfície interior e exterior;
- **Aperto interno:** a força das garras é aplicada apenas na superfície interior do objeto.

A garra externa é utilizada em objetos compactos, sendo em algumas situações a única forma de agarrar o objeto. No entanto, esta opção torna-se mais problemática quando os objetos estão agrupados, dificultando a operação *pick* ou *place*. Esta situação pode ser ultrapassada com as garras intermédias ou internas, no entanto, é necessário que o objeto possua uma abertura ou furo.

Os elementos (dedos) das garras podem ainda ser baseados quanto à flexibilidade de adaptação à geometria do objeto, podendo ser passivos ou ativos. Os elementos passivos possuem ligações simples articuladas e auto adaptam-se à superfície do objeto quando lhes é aplicada uma força. Já os elementos ativos adaptam-se à geometria da superfície do objeto através do controlo independente de cada articulação. Cada elemento da garra pode ser definido como estacionário, flexível passivo ou flexível ativo, como representado na Figura 2.9.

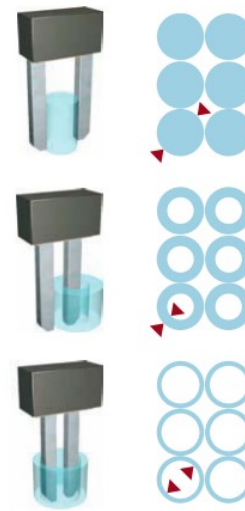


Figura 2.8: Diferentes configurações para agarrar um objeto (Wolf et al., 2005).

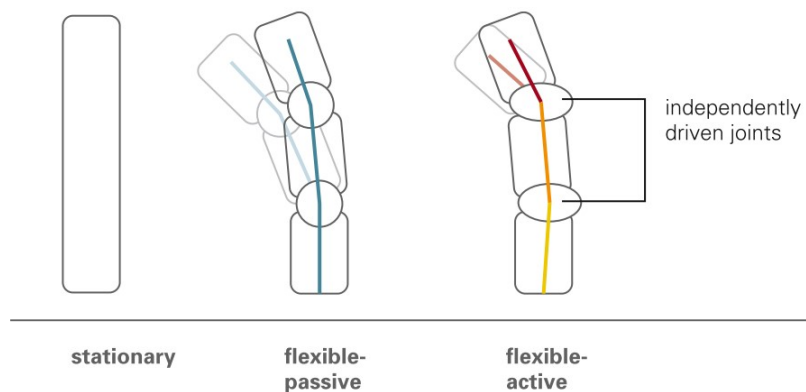


Figura 2.9: Classificação dos elementos da garra quanto à flexibilidade (Wolf et al., 2005).

O modelo flexível ativo representa o elemento de garra com maior flexibilidade. Diversos estudos têm sido realizados sobre este modelo, o qual se baseia no dedo humano. Na Figura 2.10 pode observar-se um exemplo de sucesso da implementação industrial deste conceito, uma garra conhecida como *Barrett Hand*. Esta garra possui um total de três elementos, com duas articulações cada um. São utilizados apenas quatro servo motores, que fornecem a energia necessária para o movimento das oito articulações da garra. Este mecanismo permite ainda controlar a força exercida e a velocidade (Townsend, 2000).

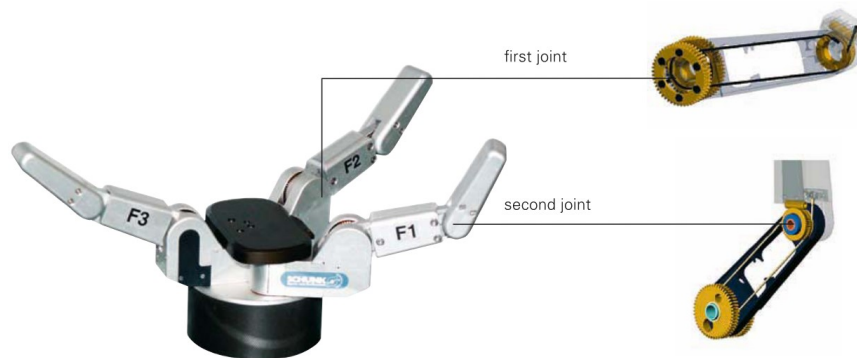


Figura 2.10: Exemplo de uma garra baseada no conceito ativo flexível (Wolf et al., 2005).

2.2.4.2 Ventosas

Este tipo de garra é frequentemente utilizado na manipulação de objetos específicos como o vidro ou chapa metálica. Os objetos devem possuir superfícies macias, com pouca sujidade e de preferência possuir superfícies planas, de modo a que se possa obter vácuo entre as superfícies do objeto e das ventosas (Singh e Joshi, 2006).

Uma das principais vantagens deste sistema, e que o torna amplamente utilizado em aplicações industriais, é a flexibilidade dos seus componentes. A qualquer momento o sistema pode ser rapidamente readaptado a novas condições, por exemplo quando a peça a manipular é alterada.

A pressão exterior é muito superior à pressão no interior da ventosa. O ar procura entrar no interior da ventosa através da folga entre a peça e a ventosa. Isto provoca o aprisionamento do ar, ficando a peça fortemente agarrada às ventosas. A capacidade para elevação do objeto depende da área da ventosa e da diferença de pressão entre as superfícies interior e exterior da ventosa.

i. Tipos de ventosas e materiais

Existe uma vasta gama de ventosas disponíveis em diferentes formas e materiais. A sua seleção deverá ser realizada em função da aplicação, considerando fatores como as condições da superfície do material a agarrar, a carga de trabalho, o tempo de vida e as condições do meio envolvente, tais como agentes corrosivos e temperatura de operação.

Os materiais mais utilizados para o fabrico das ventosas são a borracha nitrílica (NBR), o poliuretano, o silicone, borracha com flúor (FPM) e a borracha de butadieno. No entanto, a sua seleção deve ser realizada de acordo com as condições de trabalho a que serão sujeitas.

Quanto à forma, as ventosas podem ser divididas em quatro categorias, como mostra a Figura 2.11:

- **Ventosa universal:** utilizadas em superfícies planas ou com ligeira curvatura. Apresentam menor custo, no entanto desgastam-se mais facilmente;
- **Ventosa plana com barras:** adequadas para superfícies planas ou flexíveis. Permitem pequenos movimentos durante as operações de carga, apresentando menor desgaste e permitindo movimentos mais rápidos e seguros;

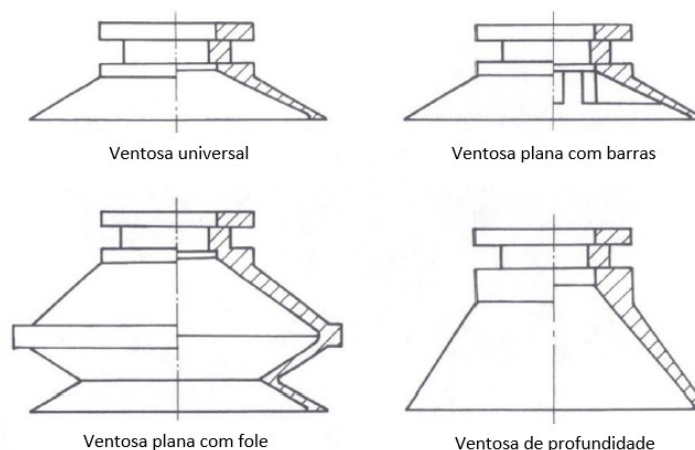


Figura 2.11: Tipos de ventosas (Bolmsjo, 2006).

- **Ventosa plana com fole:** são geralmente utilizadas em superfícies curvas ou inclinadas. Podem ser usadas em diversas áreas, contudo permitem grandes movimentos e baixa estabilidade em determinadas situações, dependendo do número de foles;
- **Ventosa de profundidade:** podem ser utilizadas em superfícies irregulares ou curvas.

ii. Geradores de vácuo

Para a geração do vácuo do necessário para a atuação do sistema podem utilizar-se basicamente dois tipos de alimentação:

- **Elétrica:** aspiradores de vácuo (*vacuum blowers*) e bombas de vácuo são utilizados quando o ar comprimido não está disponível e é necessária elevada capacidade de sucção;
- **Pneumática:** dispositivos como as válvulas geradoras de vácuo permitem obter tempos de ciclo curtos e podem ser integrados diretamente no sistema devido ao seu design compacto e leve.

As bombas de vácuo utilizam um motor elétrico para gerar o vácuo e requerem pouca manutenção. Permitem atingir níveis elevados de vácuo devido ao elevado fator de compressão.

Os aspiradores de vácuo permitem obter as taxas de sucção mais elevadas devido ao elevado volume do canal de circulação do ar e à forma das lâminas utilizadas para gerar o vácuo. Este tipo de gerador permite ainda realizar o vácuo de grandes volumes num curto período de tempo. São tipicamente utilizados em operações de manipulação de materiais porosos.

A válvula geradora de vácuo é um dispositivo simples, confiável e mais barato, contudo está dependente da fonte de ar comprimido que utiliza. O funcionamento destes dispositivos baseia-se no princípio de Venturi (Figura 2.12). O ar comprimido é fornecido pela entrada (A) do gerador, fluindo pelo bocal (B), acelerando e comprimindo o ar. Após a passagem pelo bocal, o ar desacelera, criando o vácuo através do ar aspirado pela entrada (D). Por fim o ar comprimido e o ar aspirado escapam pelo silenciador (C).

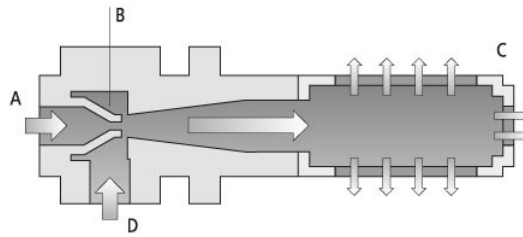


Figura 2.12: Funcionamento das válvulas geradoras de vácuo de acordo com o princípio de Venturi (Schmalz, 2019a).

Para além das vantagens já referidas, estes dispositivos têm a capacidade de gerar vácuo rapidamente e não possuem partes flexíveis, o que resulta em baixa necessidade de manutenção e desgaste.

A geração de vácuo pode também ser obtida por meio de cilindros pneumáticos. Num projeto desenvolvido por Reddy e Eranki (2016), a geração do vácuo é realizada utilizando um cilindro pneumático para cada uma das ventosas (Figura 2.13). No entanto, esta solução revela-se mais complexa devido à necessidade de controlar cada um dos cilindros e contribuindo ainda para um maior peso da garra.

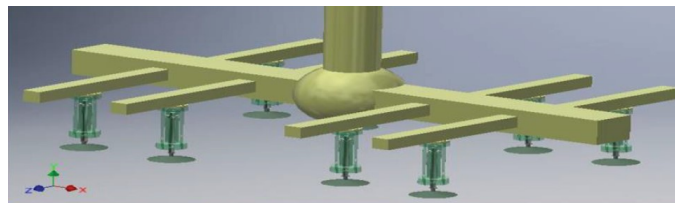


Figura 2.13: Geração de vácuo através de cilindros pneumáticos (Reddy e Eranki, 2016).

iii. Dimensionamento

De modo a assegurar o sucesso da implementação e funcionamento de um sistema de vácuo, é essencial que este seja projetado de acordo com os requisitos da aplicação, tendo em consideração as questões económicas e de segurança. Na Figura 2.14 está representado o procedimento a utilizar para o dimensionamento adequado de um sistema de vácuo.

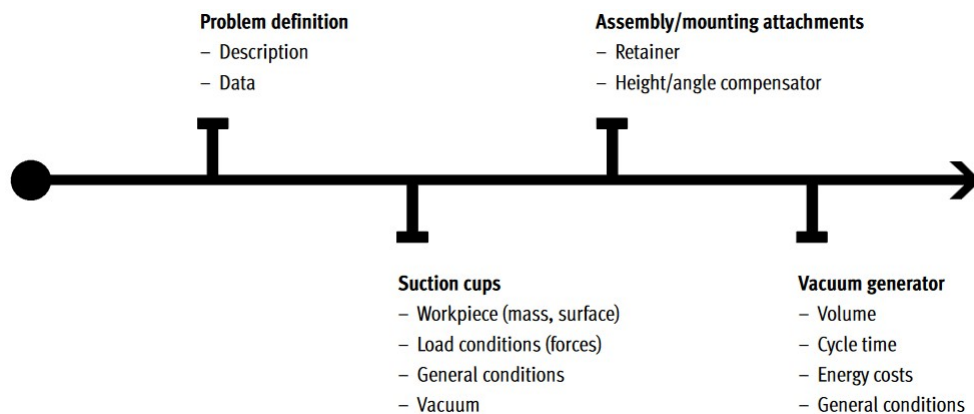


Figura 2.14: Etapas de dimensionamento de um sistema de vácuo (Festo, 2011).

O valor da força teórica de retenção (F_{TR}) deve ser determinado de acordo com o tipo de carregamento. O cálculo deste valor deve ser baseado no pior dos cenários com a máxima força teórica de retenção, de modo a assegurar que as ventosas agarram a peça com segurança durante todo o processo.

O cálculo da força de retenção representa um valor teórico, pelo que em aplicações práticas, fatores como o estado da superfície da peça, tamanho e forma das ventosas, assim como a rigidez da superfície têm um papel determinante no desempenho do processo, sendo por isso necessário utilizar um fator de segurança (S). Este pode ser definido com base no tipo de movimento a realizar. Para a movimentação horizontal e vertical da peça é utilizado um valor mínimo de 1,5. Por outro lado, em movimentos rotacionais é recomendado um fator de segurança de pelo menos 2,0 (Schmalz, 2019c; Festo, 2019).

O coeficiente de atrito (μ) representa a relação entre a força de atrito e a força normal. O seu valor pode ser estimado através de testes experimentais, no entanto podem ser usados valores de referência. Na Tabela 2.4 encontram-se alguns valores típicos do coeficiente de atrito, dependendo do material da ventosa e da peça. No caso de superfícies metálicas sem óleo pode ser utilizado o valor típico de 0,5.

Tabela 2.4: Valores de referência para o coeficiente de atrito (Festo, 2019).

Material da ventosa	Material da peça	Coeficiente de atrito
Silicone	Vidro	0,5
Silicone	Superfície molhada	0,1
Poliuretano	Metal	0,5
Poliuretano	Cartão	0,7
Neoprene	Madeira	0,5
Neoprene	Acrílico	0,8
Borracha nitrílica	Metal	0,5
Borracha nitrílica	Superfície oleosa	0,1

De seguida apresentam-se, de forma simplificada, os cenários de carregamento mais comuns. Em que m representa o valor da massa a elevar, g a aceleração da gravidade, a representa a aceleração com que a peça é levantada e F_a a força de aceleração. Os três cenários de carregamento mais importantes e frequentes são:

- **Cenário 1:** Ventosa horizontal e força aplicada na vertical

Neste caso, as ventosas agarram a peça na horizontal, elevando-a verticalmente (Figura 2.15). A força teórica de retenção pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$F_{TR} = m \cdot (g + a) \cdot S \quad (2.1)$$

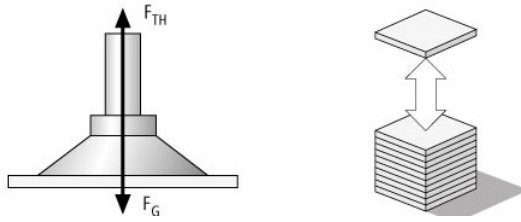


Figura 2.15: Condição de carregamento no cenário 1 (Schmalz, 2019b).

- **Cenário 2:** Ventosa horizontal e força aplicada na horizontal

A peça é levantada verticalmente e transportada na horizontal (Figura 2.16). Neste caso é necessário considerar o coeficiente de atrito na expressão:

$$F_{TR} = m \cdot \left(g + \frac{a}{\mu} \right) \cdot S \quad (2.2)$$

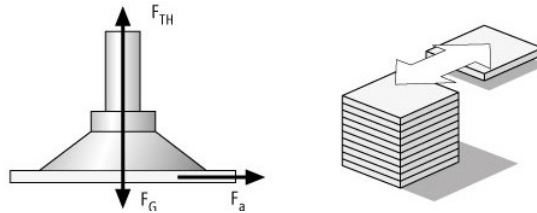


Figura 2.16: Condição de carregamento no cenário 2 (Schmalz, 2019b).

- **Cenário 3:** Ventosa vertical e força aplicada na vertical

As ventosas agarram a peça, deslocando-a através de movimentos rotativos (Figura 2.17). Nesta situação recorre-se à expressão seguinte:

$$F_{TR} = \left(\frac{m}{\mu} \right) (g + a) \cdot S \quad (2.3)$$

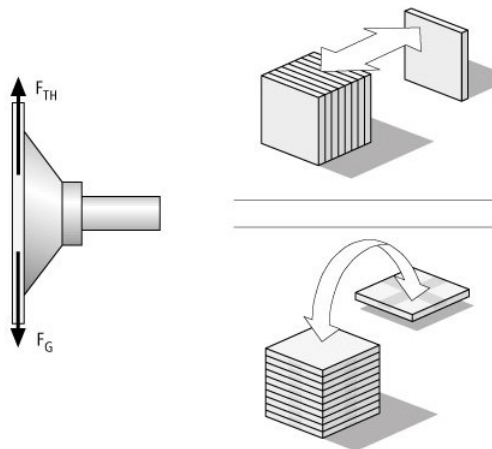


Figura 2.17: Condição de carregamento no cenário 3 (Schmalz, 2019b).

A força teórica de retenção representa a força total que as ventosas devem criar para a manipulação segura da peça. A força de sucção (F_s) é função da diferença entre a pressão ambiente e a pressão no interior das ventosas e da área de contacto, devendo tomar um valor superior ao obtido da força teórica de retenção ($F_s > F_{TR}$).

Após a seleção das ventosas, podem definir-se os elementos de montagem a utilizar, tais como elementos compensadores de altura, compensadores angulares e tipo de conexões. Podem ainda ser seleccionadas as tubagens de vácuo, distribuidor, assim como sensores de vácuo e a válvula solenóide para ligar e desligar o vácuo.

Para a seleção do gerador de vácuo devem ser considerados parâmetros como o volume a evacuar, o tempo de ciclo, a economia de ar, nível de ruído, nível de vácuo atingido, entre outras características. Um nível de vácuo mais elevado permite aumentar a força de sucção, contudo exige um maior consumo de energia (Figura 2.18). Para a manipulação de peças metálicas é recomendado um nível de vácuo entre -0,6 e -0,8 bar.

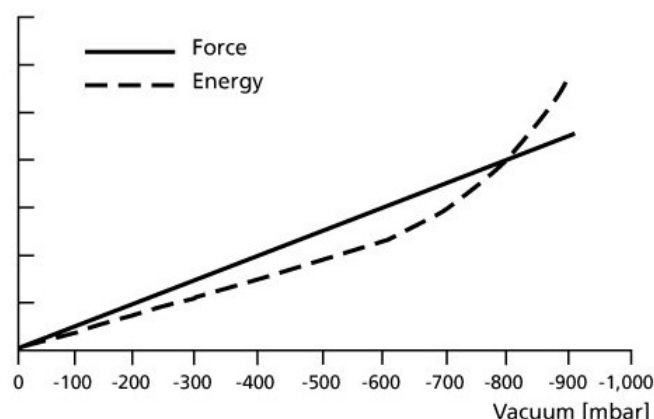


Figura 2.18: Relação entre o nível de vácuo gerado e a energia consumida (Schmalz, 2019b).

O gerador representa um fator decisivo para o ciclo de movimentação do sistema (Figura 2.19). O tempo necessário para evacuar todo o volume (t_E) e o tempo necessário para libertar a peça (t_S) dependem do gerador utilizado. A soma destes períodos com o tempo de movimentação da peça (t_1) e o tempo de movimentação sem a peça (t_2) resulta no tempo de ciclo do sistema de vácuo (T_C).

2.2.4.3 Garras magnéticas

As garras magnéticas, como a representada na Figura 2.20, são usadas na manipulação de materiais ferrosos, sendo especialmente adequados para superfícies planas. Existem dois tipos de garras magnéticas: de ímanes permanentes e de eletroímãs.

As garras de ímanes permanentes não necessitam de qualquer fonte de energia, o que as torna particularmente adequadas para operar em condições de trabalho perigosas. São também mais seguras, uma vez que permanecem ativadas quando ocorrem cortes de energia. O seu funcionamento não requer circuitos elétricos, não existindo possibilidade de gerar arcos elétricos durante a

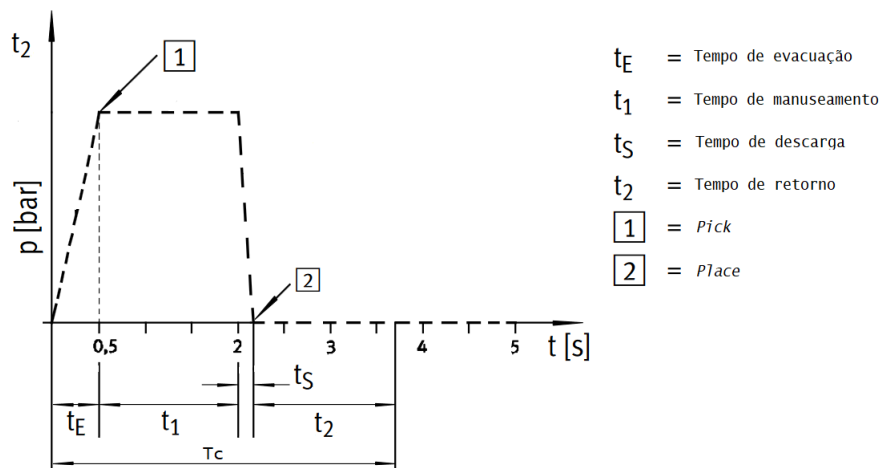


Figura 2.19: Tempo de ciclo de um sistema de vácuo (adaptado de Festo (2011)).

produção. A separação da peça do ímã permanente implica a utilização de um extrator (*stripper push-off pin*), incorporado na garra (Bernier, 2014).

Para as garras que utilizam eletroímãs é necessária uma fonte de corrente contínua e uma unidade de controlo. Neste caso, a libertação da peça é mais fácil, uma vez que a unidade de controlo reduz o nível de polaridade até desativar o eletroímã. Este processo ajuda ainda a desmagnetizar a peça (Singh e Joshi, 2006).

A utilização de garras magnéticas nas operações de manipulação possui as seguintes vantagens:

- Rapidez ao agarrar a peça;
- Flexibilidade, uma vez que pode ser usado em peças de diferentes tamanhos;
- Capacidade de agarrar peças com furos;
- Apenas necessitam de uma superfície para agarrar a peça;
- Requer pouca manutenção.

Por outro lado, existem algumas desvantagens associadas a este tipo de garra:

- Ligeira magnetização da peça;
- Possibilidade de agarrar mais do que uma peça em simultâneo. Este problema poderá ser solucionada através do dimensionamento da garra, adequando o campo magnético gerado à espessura da peça;
- A presença de uma pequena quantidade de óleo reduz a capacidade de carga;
- Em movimentos rápidos as peças podem deslizar;
- Restos metálicos podem permanecer agarrados à garra;
- Apenas podem ser usados com materiais ferrosos.



Figura 2.20: Exemplo de uma garra magnética (Bernier, 2014).

2.2.4.4 Garras adesivas

As garras adesivas utilizam uma substância para agarrar o objeto. São mais utilizadas na manipulação de objetos leves, em situações onde a utilização de outro tipo de garra seria menos eficaz. Uma das suas limitações é a perda de aderência com o uso repetido. De modo a ultrapassar esta limitação, a garra pode ser alimentada pelo material adesivo. Tal como nas garras magnéticas de ímanes permanentes, existe também a incapacidade para libertar o objeto, sendo necessário um dispositivo auxiliar (Singh e Joshi, 2006).

2.2.4.5 Ferramentas de soldadura

Entre as diversas ferramentas que um braço robótico pode utilizar estão as ferramentas de soldadura, designando-se neste caso por robôs de soldadura. Estes são amplamente utilizados a nível industrial, destacando-se os robôs de soldadura por arco elétrico.

Na soldadura por arco, a estabilidade do processo é sensível aos principais parâmetros de soldadura, tais como a corrente, tensão, velocidade de soldadura, gás de proteção e da extensão do arco elétrico. Uma pequena variação na distância entre a tocha de soldadura e a peça a soldar pode provocar uma variação considerável na corrente e na tensão, e em consequência afetar a qualidade da soldadura (Pires et al., 2003). A utilização de robôs na realização das operações de soldadura, permite não só obter melhor estabilidade do processo como também melhorar a consistência e qualidade da solda, diminuindo os tempos de ciclo e aumentando a eficiência. A sua utilização permite ainda evitar riscos de saúde para os trabalhadores, limitando a exposição a fumos e evitando acidentes.

A tocha de soldadura representa o *end effector* e é montada na extremidade (*wrist*) do robô. Existem diversos tipos de tochas, pelo que a sua escolha depende dos requisitos e metodologias do processo de soldadura. Nas Figuras 2.21a e 2.21b podem observar-se dois tipos de tocha distintas, utilizadas na soldadura MIG (*metal inert gas*) e TIG (*tungsten inert gas*), respetivamente.

Na soldadura MIG é utilizado um material consumível, semelhante ao material a soldar. O consumível é usado como eletrodo, sendo continuamente alimentado a partir de uma bobina, contribuindo para a porção de metal fundido durante o processo. Quanto à soldadura TIG, é utilizado um eletrodo não consumível de tungsténio para estabelecer o arco elétrico. O material de adição

(a) Tocha de soldadura MIG ([Industry, 2019](#)).(b) Tocha de soldadura TIG ([Cloos, 2018](#)).

Figura 2.21: Tochas de soldadura para os processos MIG e TIG.

é fornecido separadamente de forma contínua. Em ambos os processos são usados gases inertes como o hélio ou o argônio para rodear a zona do arco elétrico e proteger as superfícies fundidas da oxidação ([European Aluminium, 2015](#)).

Para além da tocha de soldadura, o robô está equipado com um sistema de alimentação do material consumível e uma fonte de alimentação para fornecer a energia elétrica necessária para realizar a operação.

2.3 Sistemas transportadores

Os transportadores, tal como os robôs utilizados nas operações *pick and place*, não acrescentam valor ao produto em movimento. Desta forma, estes incluem-se no sistema auxiliar do processo de fabrico, influenciando indiretamente o custo final do produto. Contudo, a implementação de transportadores nas instalações produtivas apresenta vantagens como:

- Eliminar ou reduzir operações manuais de transporte;
- Melhorar o fluxo de materiais entre operações;
- Diminuir a penosidade para o operador;
- Aumentar a cadência de produção;
- Transportar produtos para zonas onde seria inseguro o transporte manual.

2.3.1 Tipos de transportadores

Devido à diversidade de aplicações nas quais os transportadores podem ser aplicados, o mercado disponibiliza uma vasta gama destes sistemas. Para a sua seleção devem ser considerados os seguintes fatores (mk T. G., 2019):

- **Produtos a movimentar:** peso de cada produto, peso total no transportador, forma da superfície em contacto com o transportador, dimensões, temperatura, resistência ao impacto e presença de produtos químicos;
- **Espaço de trabalho:** temperatura ambiente, poeira, ambiente explosivo, limpeza e humidade;
- **Trajeto:** em linha e/ou curvo, níveis de transporte em altura, velocidade e orientação do produto;
- **Modo de operação:** operação contínua, operação cíclica, paragens e posicionamento.

Entre os tipos de transportadores existentes destacam-se os seguintes (Figura 2.22):

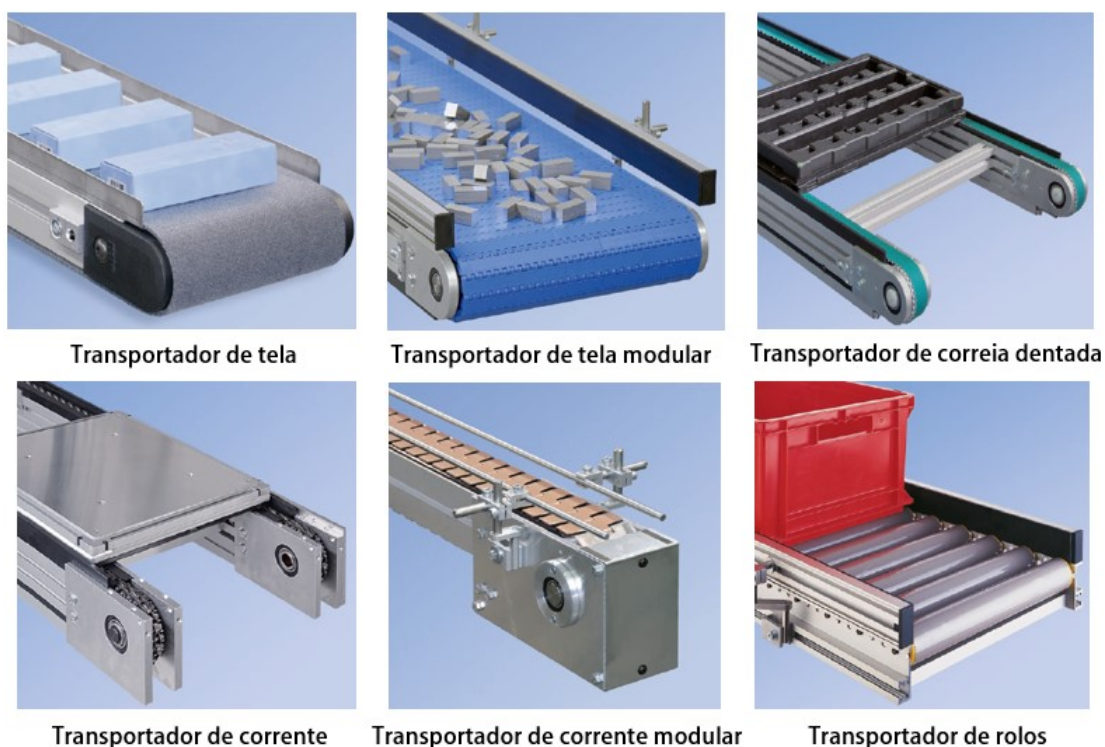


Figura 2.22: Exemplos dos principais tipos de transportadores (mk T. G., 2019).

- **Transportador de tela**

- Transporte de produtos sem restrições de localização e posição;
- Adequado para produtos de qualquer geometria;
- Ampla gama de comprimentos e larguras, com possibilidade de trajetos curvos;
- Silencioso, mesmo a velocidades elevadas.

- **Transportador de correia dentada**

- Ideal para operação cíclica de produtos estáveis;
- Elevada precisão de posicionamento;
- Permite atingir elevada velocidade e aceleração com baixo ruído;
- Pode utilizar duas ou mais vias de transporte nas quais podem ser fixados elementos de suporte;

- **Transportador de corrente**

- Elevada capacidade de carga;
- Diversidade de correntes com possibilidade de incluírem acessórios para ligação de suportes;
- Adequado para ambientes que envolvem sujidade e óleos.
- Pode utilizar duas ou mais vias de transporte;
- Robusto e resistente a temperaturas extremas.

- **Transportador de tela modular**

- Meio termo entre os transportadores de tela e os transportadores de corrente;
- Transporte de produtos sem restrições de localização, posição e de qualquer geometria;
- Não permitem deslizamento, sendo adequados para superfícies húmidas;
- Resistente a elevadas temperaturas e substâncias químicas;
- Maior simplicidade e necessidade de manutenção.

- **Transportador de corrente modular**

- Utilizado para linhas grandes e complexas, permitindo trajetos curvos;
- Tipicamente utilizados no transporte de garrafas, latas e outras embalagens;
- Não permitem deslizamento, sendo adequados para superfícies húmidas.

- **Transportador de rolos**

- Transporte de cargas elevadas com motores de baixa potência;
- Adequado para produtos com base estável;
- Robusto, baixo custo e facilmente extensível.

2.3.2 Acionamento

No que respeita ao acionamento, todos estes mecanismos utilizam motores elétricos para gerar o movimento. Dependendo do tipo de transportador e do fabricante, existem configurações específicas de atuação para cada aplicação.

Para além de um motor elétrico estes equipamentos utilizam um redutor mecânico. Estes redutores possuem um eixo de entrada para ligação ao motor e um eixo de saída, para ligação ao veio a movimentar. São constituídos por duas ou mais rodas dentadas, de modo a reduzir a velocidade do eixo de entrada para o eixo de saída. O motor elétrico e o redutor podem ser instalados separadamente ou em conjunto (motoredutor) (McGuire, 2010).

Geralmente o atuador é colocado na extremidade de descarga do transportador, como mostra a Figura 2.23, sendo considerada a solução mais segura e económica. Caso a direção de transporte seja reversível, o atuador poderá ser montado na zona central do transportador (mk T. G., 2019).

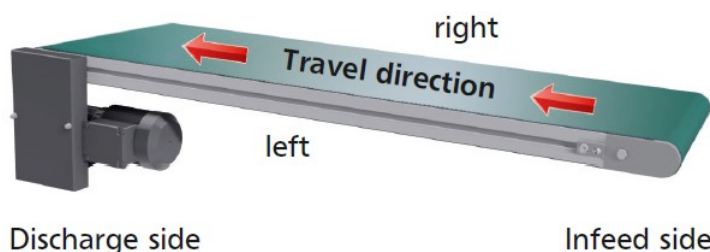


Figura 2.23: Local de montagem do atuador no transportador (mk T. G., 2019).

2.3.3 Transportadores de corrente

De seguida, os transportadores de corrente são abordados com maior detalhe, uma vez que foram considerados os mais apropriados para a aplicação em estudo.

2.3.3.1 Características das correntes

Existem diferentes tipos de correntes para transportadores, os mais comuns são:

- **Correntes de pino oco:** permitem fixar elementos de suporte através de parafusos inseridos no pino oco;
- **Correntes de pino sólido:** para dimensões equivalentes às correntes de pino oco, estas são mais robustas, com uma maior tensão de rotura, sendo recomendadas para condições mais exigentes de operação.

As correntes do transportador podem também possuir acessórios de ligação integrados no corpo da própria corrente, permitindo a montagem de elementos de suporte para o material a movimentar. Na Figura 2.24 podem observar-se alguns dos acessórios de transporte disponibilizados pelos fabricantes de correntes.

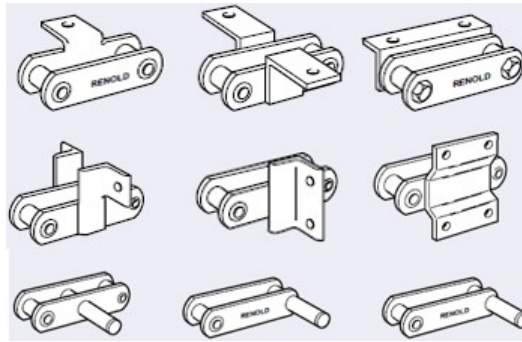


Figura 2.24: Acessórios de transporte para correntes (Renold, 2019).

Um outro aspeto importante a considerar na seleção do tipo de corrente é o passo, que representa a distância entre dois pinos consecutivos. Regra geral, deve utilizar-se o maior passo possível (garantindo a correta operação da corrente), sendo economicamente mais vantajoso, devido ao menor número de componentes por unidade de comprimento.

2.3.3.2 Tensão aplicada na corrente

Relativamente aos esforços na corrente transportadora, para uma carga uniformemente distribuída, existe um aumento na tensão aplicada na corrente, desde o zero teórico (ponto A) até a um máximo (ponto D), conforme representado na Figura 2.25.

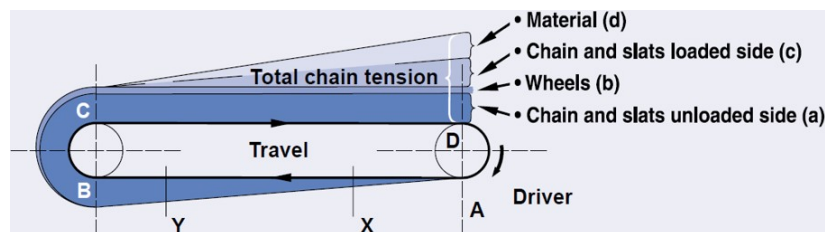


Figura 2.25: Tensão acumulada ao longo da corrente transportadora (Renold, 2019).

A máxima tensão aplicada na corrente é dada pela soma das seguintes componentes:

- (a) Movimentação da corrente e acessórios de suporte na zona sem carga;
- (b) Rotação das rodas dentadas e veio;
- (c) Movimento da corrente e acessórios de suporte na zona com carga;
- (d) Movimentação da carga.

Com base neste princípio, foram estabelecidas diferentes configurações para os transportadores de corrente, nas quais se enquadram a maioria das aplicações. De seguida são apresentadas as configurações mais comuns, assim como as respetivas expressões para determinação da tensão (T) a aplicar na corrente. Em que P_1 representa a massa do material a transportar, P representa a massa total da corrente (incluindo elementos de suporte) e N o número de correntes do transportador.

É ainda conveniente definir as componentes responsáveis pelo atrito. O coeficiente f_1 , permite definir a força necessária para superar o atrito quando ocorre deslizamento da corrente. Este valor depende dos materiais em contacto e do nível de lubrificação existente (ZMC, 2019).

Quando são utilizadas correntes de rolos é necessário superar o atrito devido ao deslizamento e ao rolamento, cujo coeficiente é definido por f_2 , podendo ser definido pela seguinte expressão:

$$f_2 = C \cdot \frac{d}{D} + \frac{b}{D} \quad (2.4)$$

em que d representa o diâmetro exterior da bucha, D o diâmetro exterior do rolo e b um coeficiente dependente dos materiais utilizados e do grau de acabamento (1 para superfícies lisas e 2 para superfícies rugosas). O atrito devido ao deslizamento entre a bucha e o rolo é dado pelo coeficiente C , que pode ser obtido através da Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Coeficiente de deslizamento C em função dos materiais em contacto e da lubrificação da superfície (ZMC, 2019).

Componentes em contacto	Superfície não lubrificada	Superfície lubrificada
Rolo de aço com bucha de aço	0,25	0,15
Rolo de bronze com bucha de aço	-	0,13
Rolo de nylon com bucha de aço	0,15	0,1

De modo a considerar as condições de operação e características do transportador, é utilizado um fator de serviço F_S . Na Tabela 2.6 podem observar-se diferentes fatores de serviço para as condições de operação mais comuns. A multiplicação dos valores de cada uma das condições de operação, resulta no fator de serviço total (Chains, 2018; ZMC, 2019).

Tabela 2.6: Fator de serviço de acordo com diferentes condições de operação (Chains, 2018).

Posição de carga	
Centrada	1
Não centrada	1,2
Tipo de carregamento	
Uniforme (sobrecarga até 5%)	1
Com pequenas variações (sobrecarga 5 a 20%)	1,2
Com grandes variações (sobrecarga 20 a 40%)	1,5
Frequência de arranques/paragens	
Até 5 por dia	1
De 5 por dia a 2 por hora	1,2
Acima de 2 por hora	1,5
Espaço de trabalho	
Relativamente limpo	1
Com muito pó ou sujidade	1,2
Húmido, bastante sujo ou corrosivo	1,3
Utilização diária	
Até 10 horas	1
Acima de 10 horas	1,2

Por fim, é considerado o atrito adicional devido à rotação da corrente nas rodas dentadas motoras e movidas, através do coeficiente F_A .

i. Corrente e material em deslizamento

Nesta configuração, a corrente e o material deslizam sobre uma guia de apoio (Figura 2.26).

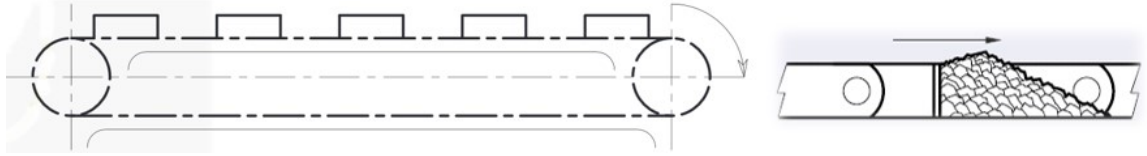


Figura 2.26: Configuração A - corrente e material em deslizamento (Renold, 2019; ZMC, 2019).

A tensão aplicada na corrente pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$T = 9,81 \cdot \frac{(P + P_1) \cdot f_1 \cdot F_S \cdot F_A}{N} \quad (2.5)$$

ii. Rolamento da corrente e material transportado

A utilização de correntes de rolos e o transporte do material através dos acessórios de ligação é definida pela seguinte configuração (Figura 2.27).

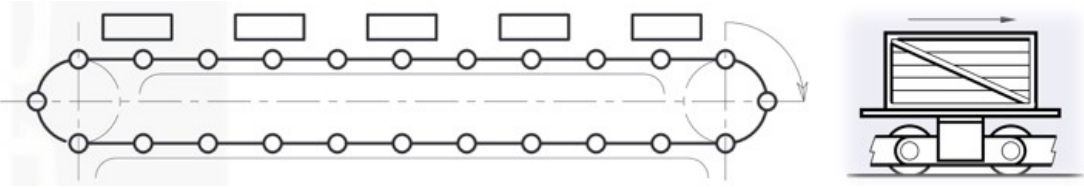


Figura 2.27: Configuração B - rolamento da corrente e material transportado (Renold, 2019; ZMC, 2019).

A máxima força de tensão pode exprimir-se da seguinte forma:

$$T = 9,81 \cdot \frac{(P + P_1) \cdot f_2 \cdot F_S \cdot F_A}{N} \quad (2.6)$$

iii. Corrente e material em deslizamento com declive

Na Figura 2.28 pode observar-se a configuração para o deslizamento da corrente e do material num plano com declive.

Definindo-se a tensão de tração pela expressão:

$$T = 9,81 \cdot \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P + P_1) \cdot f_1 + \sin(\alpha) \cdot P_1] \cdot F_S \cdot F_A}{N} \quad (2.7)$$

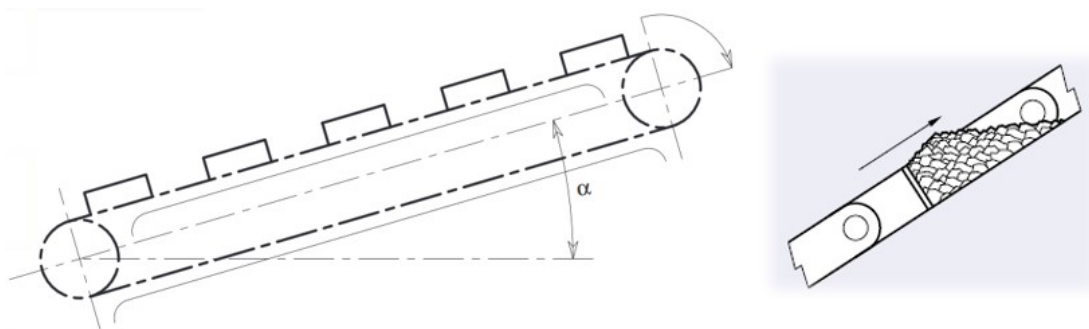


Figura 2.28: Configuração C - corrente e material em deslizamento com declive (Renold, 2019; ZMC, 2019).

iv. Rolamento da corrente e material transportado com declive

A combinação da utilização de correntes de rolos e o transporte do material num plano com declive é dado pela configuração seguinte (Figura 2.29):

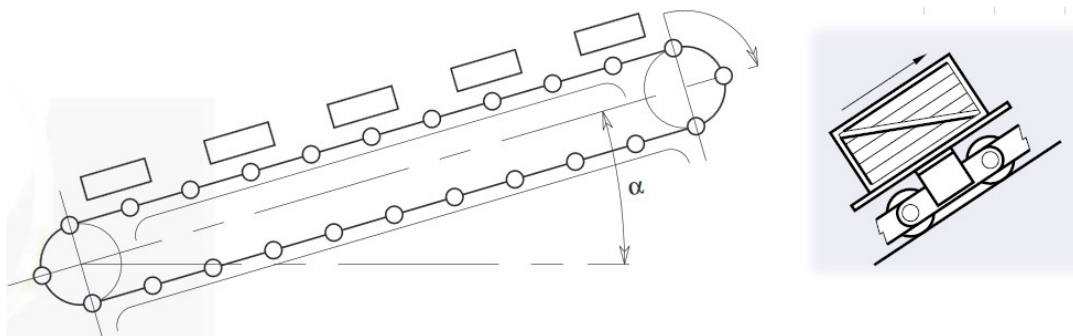


Figura 2.29: Configuração D - rolamento da corrente e material transportado com declive (Renold, 2019; ZMC, 2019).

Sendo a tensão de tração da corrente dada pela expressão:

$$T = 9,81 \cdot \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P + P_1) \cdot f_2 + \sin(\alpha) \cdot P_1] \cdot F_S \cdot F_A}{N} \quad (2.8)$$

v. Material transportado verticalmente

Por último, na Figura 2.30 está representada a configuração para a movimentação do material em transportadores verticais.

A tensão aplicada é expressa da seguinte forma:

$$T = 9,81 \cdot \frac{[(P/2) + P_1] \cdot F_S \cdot F_A}{N} \quad (2.9)$$

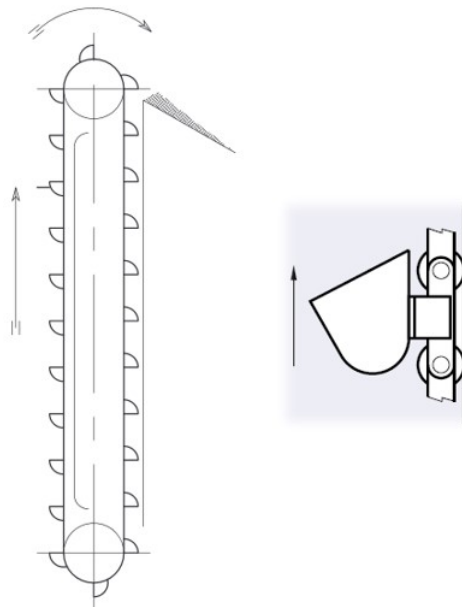


Figura 2.30: Configuração E - material transportado verticalmente (Renold, 2019; ZMC, 2019).

2.3.3.3 Fator de segurança

Geralmente, os fabricantes de correntes especificam para cada produto, a respetiva tensão de rotura. Grande parte dos aços utilizados no fabrico possuem tensões de cedência que variam entre 50% e 65% da tensão de rotura. Desta forma, é necessário aplicar um fator de segurança ao valor calculado, para que a tensão exercida na corrente seja inferior a estes valores, e assim evitar a deformação permanente da corrente. Assim, com base na tensão de rotura, para a maioria das aplicações, é utilizado um fator de segurança de 8 (Renold, 2019; Chains, 2018; ZMC, 2019). Este é um valor aparentemente elevado, contudo, em relação à tensão de cedência, a corrente selecionada está de facto a operar com um fator de segurança igual ou menor a 4, ou ainda um fator de 2 se considerarmos uma sobrecarga instantânea do transportador.

O fator de segurança deve também considerar o tempo de vida da corrente, que por sua vez depende das condições de operação, tais como sujidade, lubrificação e temperatura.

2.3.3.4 Tensionamento da corrente

Um aspeto relevante a considerar no projeto e instalação de transportadores de corrente é o tensionamento da corrente. Demasiada folga poderá causar vibrações ou ruído excessivo, assim como a má circulação da corrente nas rodas dentadas. Por outro lado, o tensionamento excessivo pode causar o desgaste prematuro ou a deformação da corrente, aumentando os custos de manutenção.

A folga da corrente (*catenary sag*) deverá ser, pelo menos, 3 % da distância entre as rodas dentadas (*center distance*) e deverá ser posicionada junto ao eixo motor do transportador, como mostra a Figura 2.31 (Chains, 2018). Existem outras configurações para o apoio da corrente na

parte inferior do transportador, no entanto a configuração apresentada é a mais comum e recomendada.

Para realizar o ajuste no tensionamento da corrente são colocados tensores que permitem fazer a translação do eixo movido do transportador.

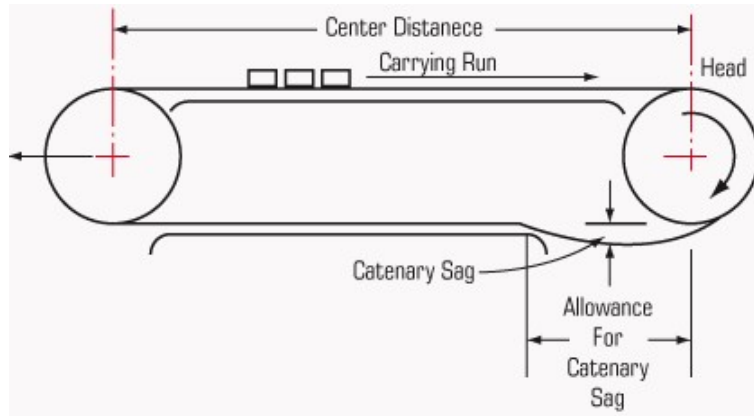


Figura 2.31: Configuração recomendada para apoio da corrente e respetiva folga (Chains, 2018).

2.3.3.5 Veio de transmissão

Num transportador, o veio de transmissão está sujeito a tensões provocadas pela torção e/ou flexão, sendo necessário o seu dimensionamento adequado. De acordo com o "*Code for design of transmission shafting*" da ASME (*American Society of Mechanical Engineering*), o dimensionamento de veios de materiais dúcteis é realizado através do Critério da Tensão de Corte Máxima (Malça, 2019). Para veios de secção circular maciça, sem cargas axiais aplicadas, o diâmetro d é dado pela seguinte expressão:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot \tau_{adm}} \cdot \sqrt{(M_F \cdot K_F)^2 + (M_T \cdot K_T)^2}} \quad (2.10)$$

onde M_F e M_T representam os momentos fletor e torsor aplicados no veio, K_F e K_T são os fatores aplicados aos momentos fletor e torsor que consideram o efeito de choque e de fadiga. A componente τ_{adm} representa a tensão de corte admissível e é dada por:

$$\begin{aligned} \tau_{adm1} &= 0,3 \cdot \sigma_c \\ \tau_{adm2} &= 0,18 \cdot \sigma_r \\ \tau_{adm}^* &= \min(\tau_{adm1}; \tau_{adm2}) \end{aligned}$$

sendo σ_c e σ_r as tensões de cedência e de rotura do material. Para veios com chaveta, a tensão de corte admissível é obtida por:

$$\tau_{adm} = 0,75 \cdot \tau_{adm}^* \quad (2.11)$$

Por vezes as limitações no dimensionamento de veios não se devem às tensões envolvidas mas sim às deformações, especialmente quando são utilizados veios longos. Em veios de secção circular maciça, a deformação angular, em graus por unidade de comprimento, é dada pela seguinte expressão:

$$\theta = \frac{584 \cdot M_T}{G \cdot d^4} \quad (2.12)$$

onde G representa o módulo de elasticidade transversal.

Capítulo 3

Situação inicial e solução proposta

3.1 Equipamentos de corte a laser

Para uma abordagem completa ao problema, foi realizada uma breve análise dos equipamentos cujo processo de fabrico poderia ser alvo de otimização. No pavilhão 1 encontram-se diversos processos de fabrico, com destaque para os processos de maquinagem e de corte a laser. O setor laser representa um setor fundamental do ciclo de produção da Quantal, dada a sua especialização na transformação de *sheet metal*.

3.1.1 Corte 2D

Os equipamentos de corte 2D representam a secção onde se inicia o ciclo de produção de grande parte das peças produzidas. Atualmente, a carga e descarga das chapas é realizada manualmente, com auxílio de uma grua, o que torna o processo produtivo mais demorado. A automação destes equipamentos poderia passar pela utilização de um braço robótico capaz de efetuar automaticamente as operações de carga e descarga.

O corte 2D é constituído pelos equipamentos apresentados nas Figuras 3.1 a 3.3. As respetivas características mais relevantes podem verificar-se nas Tabelas 3.1 a 3.3.

i. Trumpf Trumatic L3050



Figura 3.1: Trumpf Trumatic L3050.

Tabela 3.1: Especificações técnicas da Trumpf Trumatic L3050 (Kistner, 2015a).

Tipo de laser	CO ₂
Potência máxima do laser	5000 W
Espaço de trabalho	X = 3000 mm Y = 1500 mm Z = 115 mm
Velocidade máxima	300 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	900 kg
Espessuras máximas	Aço macio = 25 mm Aço inoxidável = 20 mm Liga de alumínio = 15 mm

ii. Trumpf TruLaser 5030 Fiber



Figura 3.2: Trumpf TruLaser 5030 Fiber.

Tabela 3.2: Especificações técnicas da Trumpf TruLaser 5030 Fiber (Trumpf, 2019a).

Tipo de laser	Fibra
Potência máxima do laser	4000 W
Espaço de trabalho	X = 3000 mm Y = 1500 mm
Velocidade máxima	265 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	1100 kg
Espessuras máximas	Aço macio = 25 mm Aço inoxidável = 20 mm Liga de alumínio = 20 mm

iii. Trumpf TruLaser 5030 classic

Figura 3.3: Trumpf TruLaser 5030 classic.

Tabela 3.3: Especificações técnicas da Trumpf TruLaser 5030 classic (Kistner, 2015b).

Tipo de laser	CO_2
Potência máxima do laser	6000 W
Espaço de trabalho	X = 3000 mm Y = 1500 mm Z = 115 mm
Velocidade máxima	300 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	900 kg
Espessuras máximas	Aço macio = 25 mm Aço inoxidável = 25 mm Liga de alumínio = 15 mm

3.1.2 Corte 3D

O setor de corte 3D é constituído pelos seguintes equipamentos, apresentados nas Figuras 3.4 a 3.7), podendo verificar-se as respetivas características nas Tabelas 3.4 a 3.7.

i. Prima Power Laser Next LN 1530

Tabela 3.4: Especificações técnicas da Prima Power LN 1530 (Prima Power, 2017).

Tipo de laser	Fibra
Potência máxima do laser	4000 W
Espaço de trabalho	X = 3050 mm Y = 1530 mm Z = 612 mm
Velocidade máxima	X, Y, Z = 120 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	600 kg



Figura 3.4: Prima Power Laser Next LN 1530.

ii. Prima Power Rapido



Figura 3.5: Prima Power Rapido.

Tabela 3.5: Especificações técnicas da Prima Power Rapido (Prima Power, 2017).

Tipo de laser	Fibra
Potência máxima do laser	3000 W
Espaço de trabalho	X = 4080 mm Y = 1530 mm Z = 765 mm
Velocidade máxima	175 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	300 kg

iii. Trumpf LaserCell 1005

Figura 3.6: Trumpf LaserCell 1005.

Tabela 3.6: Especificações técnicas da Trumpf LaserCell 1005 (Kistner, 2015c).

Tipo de laser	CO_2
Potência máxima do laser	4000 W
Espaço de trabalho	X = 3000 mm Y = 1500 mm Z = 500 mm
Velocidade máxima	50 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	300 kg

iv. Trumpf TruLaser Cell 7020

Figura 3.7: Trumpf TruLaser Cell 7020.

Tabela 3.7: Especificações técnicas da Trumpf TruLaser Cell 7020 (Trumpf, 2019b).

Tipo de laser	CO ₂
Potência máxima do laser	6000 W
Espaço de trabalho	X = 2000 mm Y = 1500 mm Z = 750 mm
Velocidade máxima	100 m/min
Peso máximo da peça de trabalho	600 kg

3.2 Equipamento selecionado e análise do processo

Todos os equipamentos apresentados possuem fatores que contribuem para uma menor produtividade, essencialmente devido às operações manuais de carga e descarga das peças.

A Prima Power Next é utilizada para a produção em série, enquanto os restantes equipamentos são frequentemente utilizados para a produção de protótipos. Por este motivo, optou-se por realizar a otimização do processo da Prima Power Next, uma vez que possui elevado volume de produção e características que potenciam a sua capacidade de produção, operando três turnos por dia, sete dias por semana, o que torna mais rentável a otimização do processo.

3.2.1 Características do equipamento de corte

De forma a elucidar o leitor, de seguida são apresentadas algumas características inerentes ao processo de fabrico e ao equipamento a automatizar.

Uma das características principais do equipamento é a posse de uma mesa rotativa. Esta mesa possui duas estações de corte que são utilizadas de forma alternada através da rotação da mesa, o que permite realizar a carga e descarga das peças durante o ciclo de corte, aumentando significativamente a cadência de produção.

Para o fabrico é também utilizada a estrutura representada na Figura 3.8, para suporte da peça, a qual é montada em cada uma das estações da mesa rotativa. A designação interna da empresa para esta estrutura é *gabarit*. Cada *gabarit* está atribuído especificamente a uma só peça e é geralmente projetado e fabricado na Quantal.

Ainda na Figura 3.8, podem ser observados os grampos de fixação, assinalados com os círculos a vermelho. Estes permitem manter a peça imóvel durante o processo de corte.

O posicionamento da peça no *gabarit* é relativamente simples, adaptando-se facilmente, não sendo necessário que o sistema realize qualquer verificação. Os quatro grampos de fixação auxiliam também no ajuste da peça à estrutura.

No que respeita às condições de segurança, é necessário que o operador acione um botão para o início do ciclo, disponível em cada uma das barreiras amarelas (Figura 3.9). Após o acionamento do botão, o sistema ativa um conjunto de sensores fotoelétricos, cujos feixes emitidos preenchem as áreas laterais e a área junto ao chão. Os feixes permanecem ativados durante a rotação da mesa, suspendendo a rotação se algum dos feixes for interrompido.

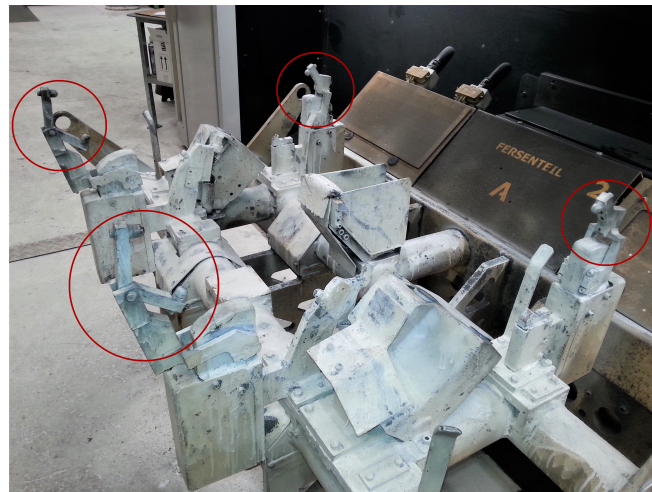


Figura 3.8: *Gabarit* para suporte da peça e grampos de fixação.

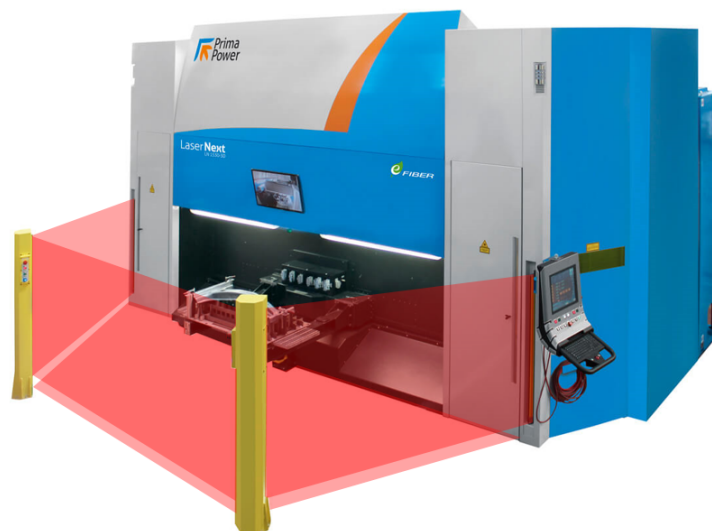


Figura 3.9: Área de segurança para rotação da mesa da máquina de corte (adaptado de [Vinamachines \(2014\)](#)).

3.2.2 Peça em fabrico

A peça sujeita ao processo de corte a laser é obtida inicialmente através do processo de conformação a quente (*hot forming*) de chapa de aço. Para realizar o processo de corte, a empresa de origem subcontrata a Quantal, que é apenas responsável por esta etapa de fabrico.

Durante o processo de corte é realizado o corte do contorno da peça, de modo a conferir a precisão dimensional desejada. Para além do contorno da peça, são também realizadas operações de corte para obter os diversos furos da peça. Na Figura 3.10 pode observar-se o modelo da peça após as operações de corte. As suas dimensões finais, bem como a sua massa inicial e final podem verificar-se na Tabela 3.8.

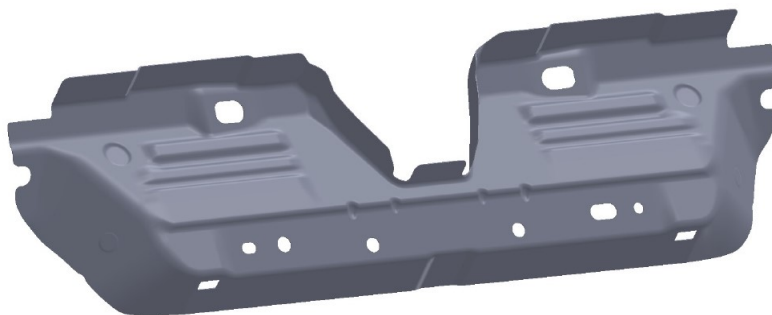


Figura 3.10: Modelo CAD da peça em fabrico.

Tabela 3.8: Dimensões e massa da peça em produção.

Massa inicial	4 kg
Massa final	3,630 kg
Comprimento	1200 mm
Largura	330 mm
Espessura	1,15 mm

Na etapa de conformação a quente são utilizados dois equipamentos de fabrico, de modo garantir a cadência desejada, existindo no entanto diferenças nas características das peças produzidas. Desta forma, de acordo com os requisitos do cliente, os dois tipos de peça não devem ser misturados, sendo necessário ter este aspeto em consideração no processo de corte.

Cada tipo de peça exige uma programação de corte diferente, pelo que, cada uma delas está associada a uma das duas estações de corte da mesa rotativa. Ou seja, no processo de corte, os dois tipos de peça são processados alternadamente.

3.2.3 Ciclo produtivo

O ciclo de produção inicialmente em vigor pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. O operador coloca a peça no *gabarit*, acionando de seguida a botoneira de segurança;
2. Os grampos do *gabarit* fixam a peça;
3. Ativação das barreiras de segurança;
4. Rotação da mesa;
5. Início do corte;
6. Após a rotação da mesa, a estação de corte anterior fica disponível e as pinças libertam a peça anteriormente processada;
7. O operador procede à remoção da peça e à separação do retalho.

A realização destas etapas traduz-se num tempo de ciclo de 47 segundos.

3.2.4 Fatores que contribuem para a baixa produtividade

Apesar do tempo de ciclo acima mencionado, existem fatores que contribuem para a baixa produtividade do processo. Foi identificado que, durante o corte da peça, à medida que cada um dos furos era efetuado, o equipamento verificava se efetivamente o furo tinha sido feito, contribuindo para o aumento do tempo do ciclo de corte.

Procedeu-se ainda à análise do processo através do registo das tarefas realizadas pelo operador. Foram realizadas três observações de uma hora, em períodos aleatórios de produção. Para a execução do processo, estava alocado um operador a tempo integral, sendo necessário um segundo operador para, periodicamente, realizar o transporte dos contentores das peças.

Durante a produção era ainda realizado o controlo dimensional e geométrico das peças. Eram controladas duas peças por contentor, nos quais são colocados dois grupos de 65 peças. Na Tabela 3.9 podem verificar-se as tarefas realizadas pelo operador responsável pelo processo, bem como o tempo de ocupação (em minutos) das mesmas e o número de peças produzidas.

Tabela 3.9: Tarefas realizadas pelo operador e tempo de ocupação.

Tarefa	Registo 1	Registo 2	Registo 3	Ocupação média
Carga, descarga e separação do retalho	3,8	29,3	17,8	28,2%
Logística de transporte dos contentores	0,0	0,0	9,8	5,4%
Pausas (ausência do operador)	36,5	2,3	3,0	23,2%
Separação das peças	1,8	10,5	8,3	11,4%
O operador aguarda pela máquina	6,3	8,5	0,3	8,3%
Verificações na máquina de corte	0,0	9,5	0,0	5,3%
O operador está noutro processo	11,8	0,0	0,0	6,5%
Acomodação das peças no contentor	0,0	0,0	6,0	3,3%
Contagem de peças	0,0	0,0	3,8	2,1%
Marcação dos furos da peça	0,0	0,0	11,3	6,3%
Total	60,0	60,0	60,0	100,0%
N.º de peças processadas	14	69	43	-
Tempo de paragem da máquina	49,0	6,0	26,3	45,2%

Verifica-se que as tarefas que ocupam grande parte do tempo do operador são a carga e descarga das peças, bem como a separação das peças a colocar na máquina. Observa-se também que uma parte significativa do tempo, o operador está ausente, provocando diretamente a paragem do equipamento de corte. Este é o fator que mais contribui para o valor para a baixa produtividade, tendo sido registado que em 45,2 % do tempo de produção o equipamento não está a produzir.

O facto de as tarefas serem realizadas manualmente tornam o processo totalmente dependente do operador. Para além das tarefas mencionadas provocarem frequentemente a paragem do equipamento de corte, existe ainda uma paragem adicional de 30 minutos por turno, para almoço.

3.3 Solução proposta

Perante a baixa produtividade registada, a otimização do processo poderia passar pelas seguintes otimizações:

- Implementar um sistema de visão para realizar o controlo de qualidade;
- Desenvolver um sistema auxiliar, autónomo capaz de colocar e retirar diretamente as peças do *gabarit*;
- Utilizar um sistema em paralelo capaz de verificar a furação da peça, removendo essa etapa do programa de corte;
- Automatizar a entrada e saída dos contentores da área de fabrico.

Concluiu-se que a automação do processo através do desenvolvimento de um sistema auxiliar seria a melhor opção. Este sistema é constituído por um braço robótico e respetiva garra, assim como tapetes transportadores para assegurar o fluxo das peças e conferir a autonomia necessária para compensar os períodos de ausência do operador.

A disponibilidade em armazém de um braço robótico em bom estado de funcionamento foi determinante para a escolha desta solução, sendo apenas necessário investir no desenvolvimento da garra e dos transportadores.

Com a implementação do braço robótico, a confirmação dos furos pode ainda ser feita pelo mesmo durante a manipulação da peça, permitindo eliminar essa etapa do programa de corte e assim reduzir o tempo de ciclo. Foram consideradas duas possibilidades:

- Colocar sensores de deteção na garra do robô: permite verificar a furação durante o transporte da peça, sem influenciar o tempo total para realizar as operações de manipulação;
- Desenvolver um painel com sensores de deteção, no qual o robô coloca a peça para verificação: implica que o robô realize movimentos adicionais, aumentando o tempo de manipulação.

A implementação desta solução irá minimizar a dependência do operador, uma vez que elimina tarefas ou efetua-as de forma mais eficaz, permitindo que o operador coloque e retire periodicamente as peças dos transportadores, bem como a realização de outras tarefas no restante tempo livre. Desta forma, será possível produzir as quantidades estabelecidas num período de tempo mais curto e assim libertar o equipamento para a execução de outras ordens de fabrico.

3.3.1 Descrição e funcionamento

Para a distinção entre os dois tipos de peças (A e B), propôs-se a utilização de dois tapetes transportadores, nos quais são colocadas as peças a processar. Os transportadores deverão ter capacidade suficiente para assegurar a produção contínua durante cerca de uma hora.

Inicialmente, devido à não perpendicularidade do feixe laser em relação à superfície da peça, existia a formação de rebarba nas peças. Desta forma, era necessário que o operador efetuasse ainda a limpeza da rebarba antes de armazenar as peças no contentor. Por este motivo, considerou-se que seria conveniente incluir na solução proposta a utilização de um terceiro transportador, no qual são colocadas as peças já submetidas ao processo de corte. Neste tapete, o braço robótico colocaria as peças em pequenos lotes com peças do tipo A e tipo B, alternadamente. Assim, seria possível que o operador recolhesse os lotes de peças do tapete, removesse a rebarba de cada lote, armazenando-os de seguida. Contudo, no decorrer deste projeto foi possível otimizar os movimentos do cabeçal de corte e assim eliminar a formação da rebarba.

Com a otimização realizada, o braço robótico poderá colocar diretamente as peças produzidas no contentor, tornando desnecessária a utilização do transportador. Simplificou-se assim o sistema, eliminando-se ainda tarefas que o operador teria de realizar.

De uma forma simplificada, podem observar-se na Figura 3.11 os elementos que constituem o processo e o seu posicionamento na área de trabalho. Estão ainda assinalados os pontos onde a garra do robô se posiciona ao longo das operações.

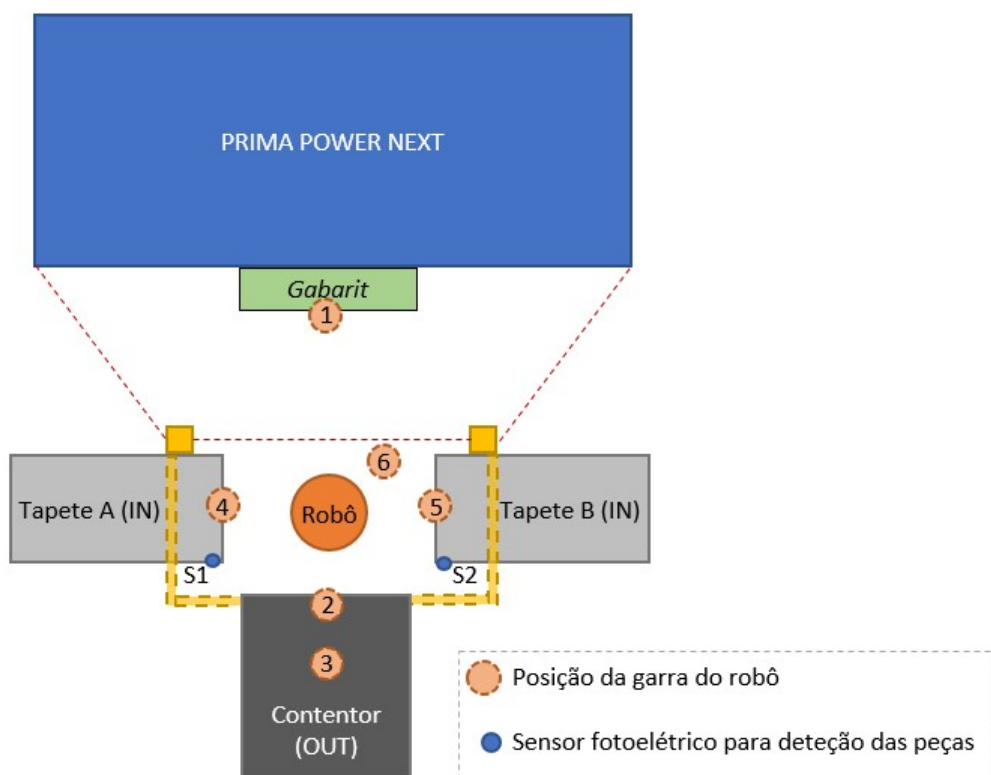


Figura 3.11: Esquema representativo da configuração proposta para a área de trabalho.

Analisando a Figura 3.11, partindo da posição de repouso (6), o robô retira a peça produzida do *gabarit* (1) e coloca-a no contentor, no respetivo lote (2 ou 3). De seguida, o robô retira uma nova peça do tapete de entrada de peças do tipo A (4) ou do tapete de entrada das peças do tipo B (5), colocando-a no *gabarit*. Por fim, o robô volta novamente à posição de repouso, de modo a permitir a rotação da mesa e se iniciarem as operações de corte.

A implementação de um braço robótico implica ainda a instalação de uma vedação de proteção no seu redor. No esquema da Figura 3.11, pode observar-se a amarelo, a localização da vedação. Esta vedação possui apenas uma abertura junto à superfície dos transportadores de modo a permitir o fluxo de peças. O dimensionamento destas vedações deve ser realizado de acordo com a norma EN ISO 13857.

De forma a obter um planeamento mais rigoroso do sistema e compreender o seu funcionamento foi ainda realizado um esquema de funcionamento recorrendo à metodologia *Grafcet* (Figura 3.12).

À medida que o robô coloca as peças no contentor, vai formando duas pilhas com cada tipo de peça. Quando cada pilha possuir 65 peças, o contentor está completo e pronto a enviar para o cliente. É necessário que o operador proceda à troca do contentor, acionando de seguida um botão para dar continuidade à produção. A contagem das peças colocadas no contentor é efetuada pelo robô.

Para a deteção das peças nos transportadores são utilizados os sensores fotoelétricos S1 e S2. Deverá ainda existir um botão de emergência para interromper o sistema a qualquer momento.

De modo a assegurar o correto funcionamento do processo, foram estabelecidas as seguintes condições para o arranque do sistema:

- Máquina de corte, robô e transportadores ligados;
- Robô na posição de repouso;
- Garra sem peça;
- Sensores fotoelétricos S1 e S2 ativos.

Em caso de interrupção da produção, não é necessário colocar peça no *gabarit* interno.

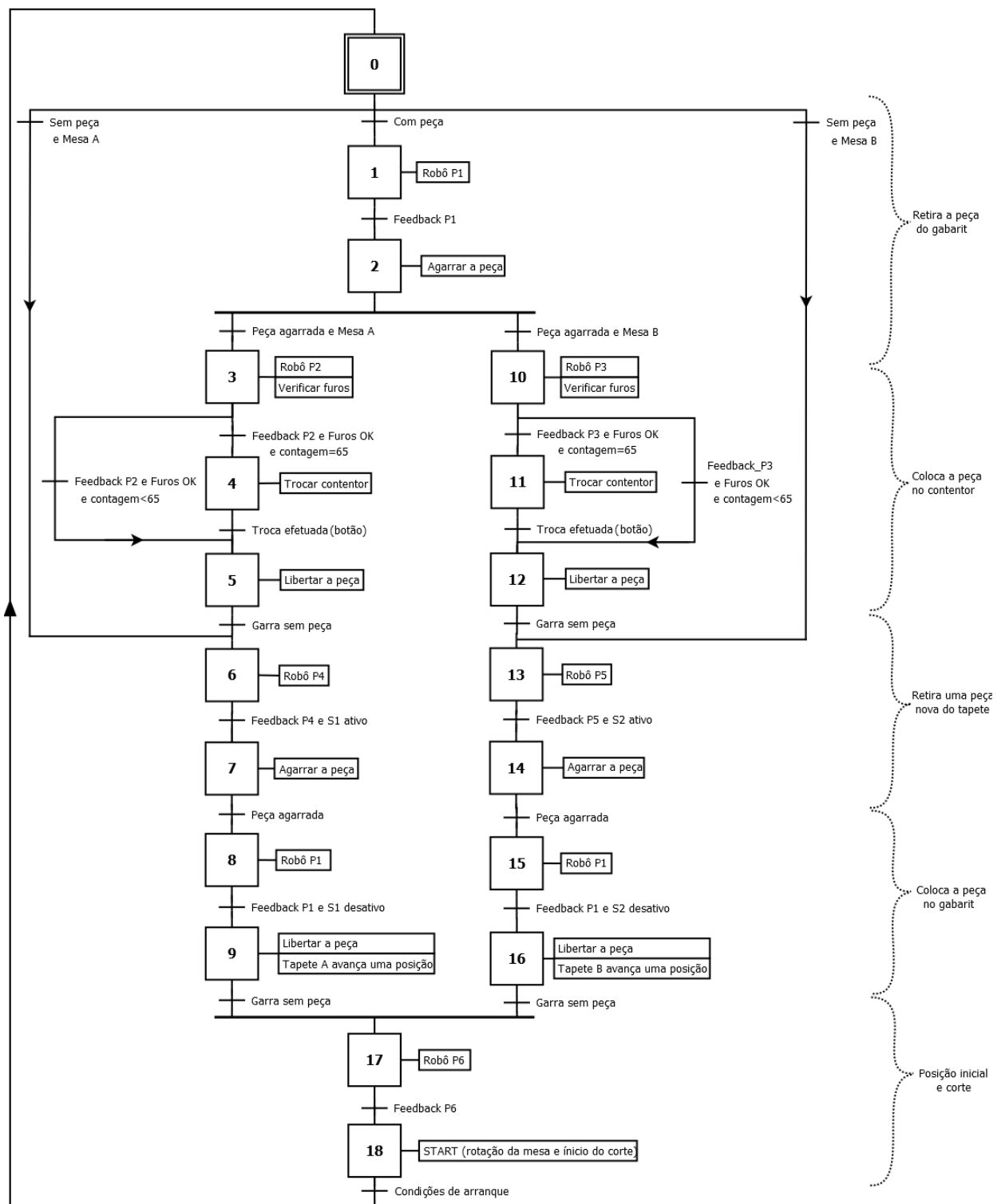


Figura 3.12: Esquema de funcionamento da solução proposta.

Capítulo 4

Desenvolvimento da solução proposta

De seguida é apresentada a fase de estudo e desenvolvimento dos principais constituintes do sistema proposto. Nas fases de projeto da garra do braço robótico e do transportador foi necessário proceder à modelação de determinados componentes. Para tal, foi utilizado o *software SolidWorks*, assim como o *software Abaqus* para realizar simulações numéricas.

4.1 Alterações ao programa de corte

Para se proceder ao projeto e desenvolvimento do sistema de alimentação das peças foi necessário ter como base o tempo do ciclo produtivo, durante o qual o robô deverá ser capaz de realizar as operações de carga e descarga das peças.

Considerou-se que o desempenho global do processo poderia ser melhorado através de alterações à programação do equipamento de corte. Por sua vez, estas alterações influenciam o tempo do ciclo de produção.

Cada ação de reprogramação da máquina implica a paragem da mesma, pelo que as alterações devem ser alvo de um planeamento cuidadoso, de forma a reduzir o número de paragens da máquina, assim como o tempo de intervenção na mesma.

4.1.1 Remoção do material excedente

A máquina de corte possui um tapete de transporte magnético, no qual o retalho proveniente do corte cai por ação da gravidade. No entanto, a remoção dos excedentes de maior dimensão está condicionada pela estrutura do *gabarit*, como é caso do material em excesso após o corte do contorno da peça. Desta forma, era necessário que, posteriormente, o operador removesse manualmente o excesso de material. Este aspeto iria dificultar as operações a realizar pelo braço robótico, pelo que a solução passou por reformular a programação da máquina de corte, de modo a dividir o excesso de material em partes menores e assim facilitar a sua queda para o tapete de transporte. Na Figura 4.1 pode observar-se a peça e o respetivo material excedente do contorno, ainda numa fase de planeamento dos cortes adicionais a efetuar.



Figura 4.1: Peça produzida e respetivo material excedente antes da reprogramação do equipamento de corte.

A solução encontrada tem no entanto um impacto negativo no ciclo de produção, prevendo-se um aumento de cerca de 1,4 segundos por cada corte adicional. Assim, foi essencial um correto planeamento dos cortes a efetuar, de modo a assegurar que as partes excedentes não ficam presas no *gabarit* durante o processo de corte, com o mínimo de cortes adicionais, de forma a minimizar o impacto no tempo de ciclo. Foi considerado necessário realizar pelo menos 8 cortes, o que se traduz num valor de 11,2 segundos de aumento no ciclo de corte.

4.1.2 Furação da peça

Para a implementação da solução proposta, foi ainda necessário prever a remoção da etapa de verificação dos furos do programa de corte. Esta alteração no programa de corte permite reduzir ao tempo de ciclo 0,2 segundos por cada um dos 10 furos, ou seja, menos dois segundos por peça produzida.

Com as alterações efetuadas pode estimar-se que o tempo do ciclo de corte será de 56,2 segundos.

4.2 Braço robótico

Para o sucesso do projeto em estudo foi essencial um braço robótico capaz de efetuar as operações necessárias durante o tempo de ciclo de corte, de modo a não prejudicar a cadência de produção.

A empresa tinha em sua posse diferentes robôs funcionais, disponíveis para utilização. Tratam-se de robôs de soldadura por arco da marca FANUC, modelos ARC Mate 120i L e ARC Mate 120i B/10L. As suas principais características encontram-se nas Tabelas 4.1 e 4.2. Analisando as características dos robôs, verifica-se que o modelo ARC Mate 120i B/10L possui um alcance mais elevado, permitindo ainda atingir velocidades superiores e portanto, realizar as operações

mais rapidamente. Desta forma, e devido à falta de informação sobre o modelo ARC Mate 120i L, optou-se por utilizar o modelo ARC Mate 120i B/10L, apresentado na Figura 4.2.

Tabela 4.1: Informações do robô ARC Mate 120i L ([RobotWorx, 2019a](#)).

Especificações		Velocidade	Amplitude de movimento
Eixos:	6	J1 140°/s (2,44 rad/s)	J1 ±165°
Carga máxima:	10,00 kg	J2 140°/s (2,44 rad/s)	J2 +162° - 78°
Alcance horizontal:	1813,00 mm	J3 140°/s (2,44 rad/s)	J3 +285° - 135°
Repetibilidade:	±0,10 mm	J4 330°/s (5,76 rad/s)	J4 ±200°
Massa do robô:	370,00 kg	J5 330°/s (5,76 rad/s)	J5 ±140°
Estrutura:	Articulada	J6 450°/s (7,85 rad/s)	J6 ±450°

Tabela 4.2: Informações do robô ARC Mate 120i B/10L ([RobotWorx, 2019b](#)).

Especificações		Velocidade	Amplitude de movimento
Eixos:	6	J1 165°/s (2,88 rad/s)	J1 ±170°
Carga máxima:	10,00 kg	J2 165°/s (2,88 rad/s)	J2 +160° - 90°
Alcance horizontal:	1885,00 mm	J3 175°/s (3,05 rad/s)	J3 +285° - 170°
Repetibilidade:	±0,10 mm	J4 350°/s (6,11 rad/s)	J4 ±200°
Massa do robô:	220,00 kg	J5 340°/s (5,93 rad/s)	J5 ±140°
Estrutura:	Articulada	J6 520°/s (9,08 rad/s)	J6 ±450°



Figura 4.2: Fanuc Arc Mate 120i B/10L.

Para a sua adaptação às operações de movimentação das peças, é apenas necessário remover todo o equipamento de soldadura montado sobre o braço robótico.

Devido à rotação da mesa do equipamento de corte, é necessária uma distância mínima entre o braço robótico e a posição da peça no *gabarit*. Através da área de trabalho do robô, apresentada na Figura 4.3, foi possível verificar que este possui alcance suficiente.

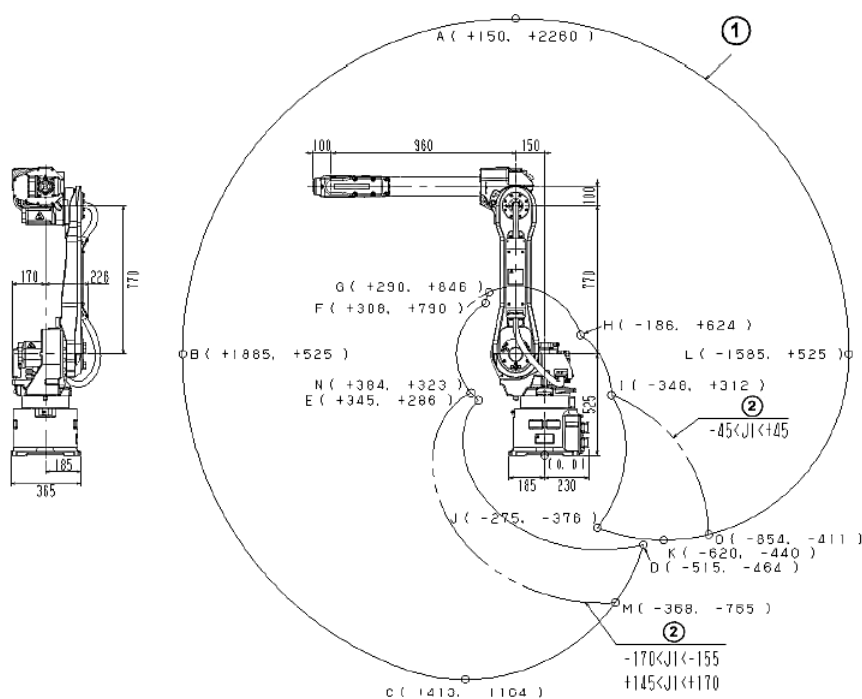


Figura 4.3: Área de trabalho do braço robótico selecionado. (FANUC, 2002).

4.2.1 Controlador

O robô selecionado vem equipado com o controlador R-J3iB da FANUC, representado na Figura 4.4, e respetivo pendente de ensino.



Figura 4.4: Controlador R-J3iB da Fanuc.

Para a troca de informação entre o controlador e o processo é utilizado o protocolo de comunicação *I/O Link*. O controlador possui 18 entradas digitais e 20 saídas digitais com funções já

atribuídas. Para a ligação de dispositivos periféricos tais como sensores e atuadores, estão disponíveis 22 entradas e 20 saídas. O protocolo de comunicação utilizado permite utilizar os sinais disponibilizados pelo equipamento de corte e transmiti-los ao controlador. Desta forma, é possível obter a comunicação em paralelo entre o equipamento de corte e o sistema auxiliar.

4.3 Garra

Uma máquina de corte a laser 3D permite fabricar uma grande diversidade de peças, de diferentes formas e tamanhos, com elevada cadência de produção. Com a automatização do processo prevê-se a sua disponibilidade para a produção de outras ordens de fabrico. Entre as ordens de fabrico mais recorrentes está o corte de planificados, sendo por vezes utilizados os equipamentos de corte 3D devido à sua maior velocidade de corte, comparativamente com os equipamentos de corte 2D. Desta forma, pretendeu-se projetar uma garra capaz de manipular peças com diferentes geometrias e dimensões, conferindo-lhe a flexibilidade necessária.

4.3.1 Seleção

Para a seleção do tipo de garra a utilizar, os aspetos considerados foram o tipo de peça a manusear, o peso da garra e a fonte de alimentação. É de notar que a massa da peça e da garra deverá ser inferior aos 10 kg suportados pelo robô, pelo que é essencial selecionar uma garra com o menor peso possível.

A peça em produção apresenta geometria complexa, com dimensões relativamente elevadas e com baixa espessura. Os planificados têm uma geometria simples, no entanto, podem apresentar elevadas dimensões, exigindo assim uma garra que confira a estabilidade necessária. Estes fatores tornam inadequado o uso de garras de preensão mecânica, as quais se revelam mais atrativas para a manipulação de peças compactas, com formas simples, que facilitem o aperto.

Uma solução mais adequada passaria pela utilização de uma garra magnética de eletroímã, contudo, esta encontra-se limitada quanto à flexibilidade de adaptação a diferentes superfícies, não sendo apropriada para superfícies com curvatura.

A utilização de uma garra com ventosas representa a solução mais apropriada para esta aplicação devido à sua flexibilidade. Para além disso, a leveza dos seus componentes em conjunto com uma estrutura em perfis de liga alumínio, permite ir de encontro aos requisitos de carga mencionados. A existência de uma rede de ar comprimido próxima do equipamento de corte facilita também a aplicação deste tipo de garra, possibilitando a utilização de válvulas geradoras de vácuo e assim um menor custo de investimento no sistema.

4.3.2 Estrutura

A estrutura mecânica da garra deve ser simples e permitir o fácil ajuste da posição das ventosas. A estrutura é essencialmente constituída por perfil em liga de alumínio e uma flange para a conexão ao braço robótico.

Procedeu-se à modelação da flange para posterior produção interna, recorrendo aos processos de fabrico existentes na empresa. A modelação foi baseada na superfície para montagem da garra na extremidade (*wrist*) do robô (Figura 4.5).

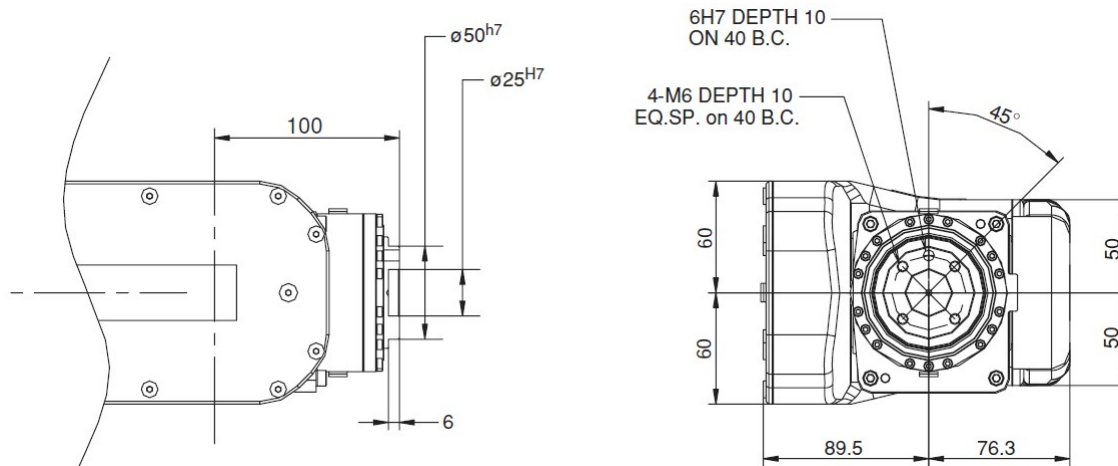


Figura 4.5: Superfície da extremidade do robô para montagem da garra (FANUC, 2002).

Com o decorrer do projeto, a configuração da estrutura e a flange modelada foram alvo de alterações, que são de seguida abordadas.

4.3.2.1 Estrutura inicial

Numa primeira abordagem, foi considerada a utilização de um único perfil em liga de alumínio, com secção 60x30 mm e 800 mm de comprimento. Na Figura 4.6 pode observar-se a estrutura considerada, já com a flange para posterior ligação ao braço robótico.

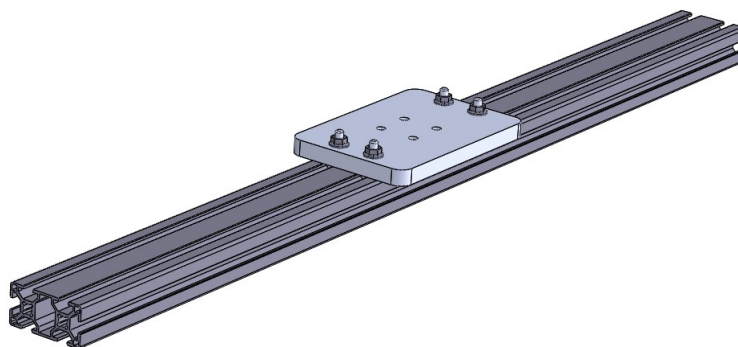


Figura 4.6: Configuração inicial da estrutura da garra.

O tipo de perfil selecionado é o mais indicado para esta aplicação devido à sua secção de geometria complexa, que permite obter uma maior resistência à flexão e facilitar a conexão dos acessórios de suporte ao perfil.

Apesar da estrutura robusta do perfil e do peso relativamente baixo que a garra terá de suportar, foi realizada uma simulação em regime estático para analisar as tensões e deslocamentos envolvidos ao longo do perfil. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados obtidos para metade

do comprimento do perfil. Foi considerado que a peça e restantes componentes da garra possuem uma massa de 8 kg.

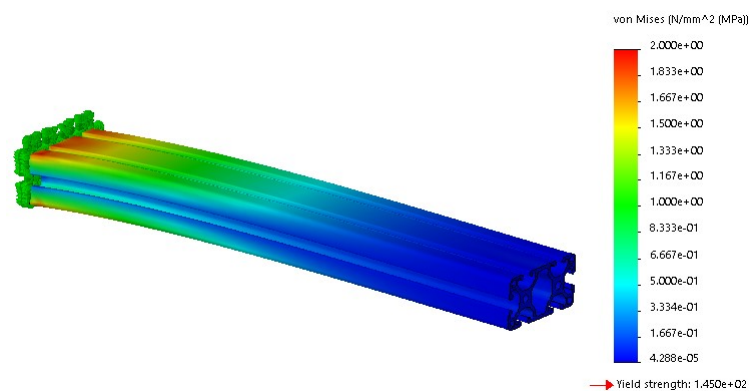


Figura 4.7: Distribuição de tensões na estrutura inicial.

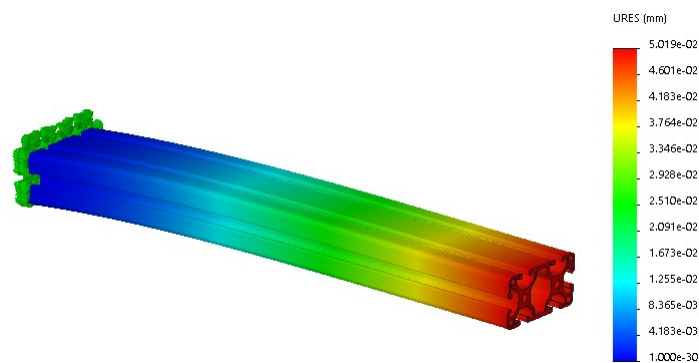


Figura 4.8: Deslocamento vertical na estrutura inicial.

Como esperado, o perfil encontra-se sobredimensionado para esta aplicação, apresentando valores residuais de tensão e de deslocamento de 2 MPa e 0,05 mm, respetivamente. Nesta fase, a melhoria da estrutura passaria pela utilização de um perfil de menor secção, contudo, no decorrer do projeto considerou-se que esta configuração não seria a mais adequada para a manipulação de diferentes peças. Optou-se assim por utilizar uma configuração mais flexível, que permitisse uma melhor distribuição das ventosas pela peça a manipular.

4.3.2.2 Estrutura final

A configuração da estrutura foi completamente reformulada, tendo sido também efetuadas correções à flange inicialmente desenvolvida. Na Figura 4.9 pode observar-se o modelo 3D da flange final, cujo desenho de definição é apresentado no Anexo A, na Figura A.1.

Para a nova estrutura foram utilizados quatro perfis em liga de alumínio, cruzados entre si. Neste caso, de modo a não comprometer o peso da estrutura, foram utilizados perfis de secção 20x20 mm. Para a definição do comprimento dos perfis, foi retirada uma amostra das ordens de fabrico dos planificados produzidos no equipamento até ao momento (Tabela 4.3).

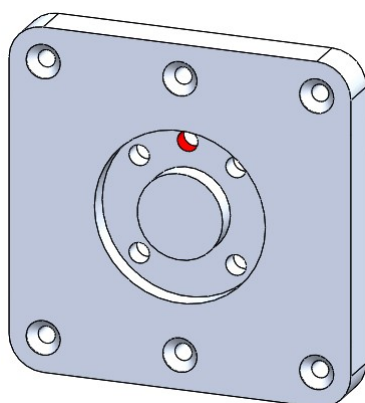


Figura 4.9: Flange modelada para conexão da garra ao braço robótico.

Tabela 4.3: Dimensões e massa dos planificados já produzidos.

Dimensões (mm)	Massa (kg)
2000x1260x1,15	22,8
2000x1235x0,99	19,2
1035x735x0,95	5,7
1065x1300x0,8	8,7
1312x977x1	10,1
1404x837x1,8	16,6
896x881x0,75	4,7
1408x1208x1,75	23,4
1057x733x1	6,1

Verifica-se que alguns dos planificados produzidos apresentam grandes dimensões, no entanto, estes possuem também uma massa superior àquela que o robô pode suportar. Assim, considerando as limitações do braço robótico e as dimensões das peças produzidas, foram utilizados dois perfis de 800 mm e dois perfis de 300 mm. Na Figura 4.10 pode observar-se a configuração final adotada para a estrutura da garra.

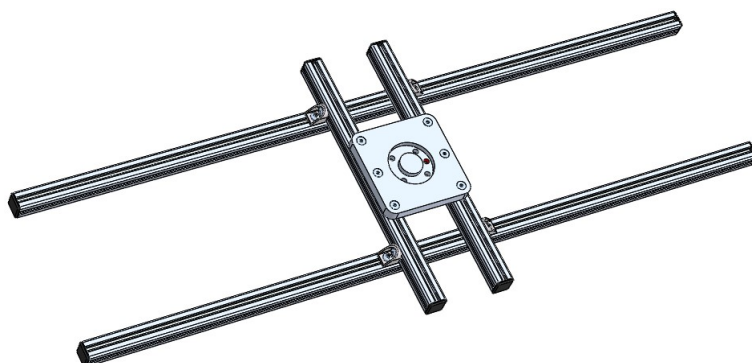


Figura 4.10: Configuração final da estrutura da garra.

Mais uma vez foi realizada uma simulação em regime estático para análise das tensões e deslocamentos envolvidos na estrutura (Figuras 4.11 e 4.12). Pode verificar-se que os valores máximos

de tensão e deslocamento são relativamente baixos, 5,58 MPa e 0,29 mm, respetivamente. Neste caso não é possível utilizar perfis de menor secção, uma vez que os utilizados são já os de menor secção disponíveis no mercado.

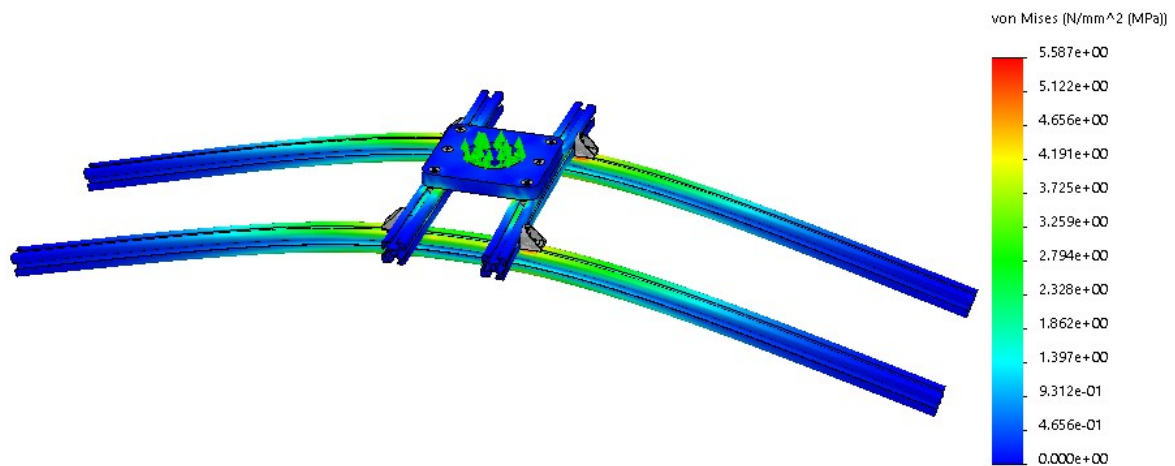


Figura 4.11: Distribuição de tensões na estrutura final.

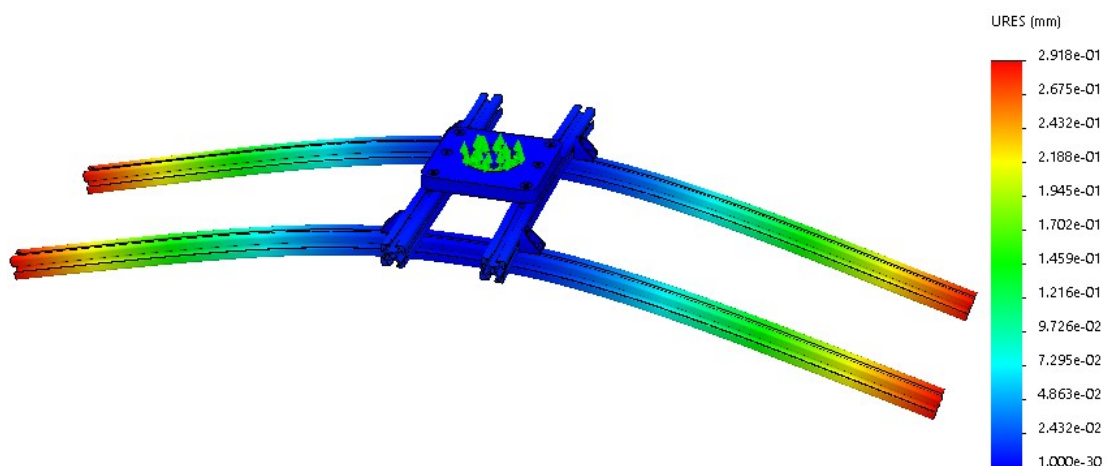


Figura 4.12: Deslocamento vertical na estrutura final.

4.3.3 Sistema de vácuo

Antes de iniciar o dimensionamento do sistema de vácuo da garra foram estabelecidas as características inerentes ao processo e definidos os requisitos a cumprir (Tabela 4.4).

Nesta fase foram tidas como base as características da peça em fabrico (Figura 3.10), uma vez que apresenta a geometria mais complexa. Dada a flexibilidade deste tipo de garra, futuramente, caso seja necessário adaptar a garra a uma peça de maior peso, basta aumentar o número de ventosas, aumentando a força de sucção.

Tabela 4.4: Requisitos e características assumidas para dimensionamento do sistema de vácuo.

Peça		Sistema de manuseamento	
Material:	Aço	Ar comprimido,	
Superfície:	Baixa rugosidade, irregular, seca	pressão de serviço:	6 bar
Comprimento:	1200 mm	Tipo de movimentos:	rotacionais
Largura:	330 mm	Aceleração máxima:	6 m/s^2
Espessura:	1,15 mm	Tempo de ciclo:	< 40 s
Massa:	4 kg	Fator de segurança:	2
		Condições do sistema:	Compensadores de altura e angulares; Possibilidade de aumento da capacidade de carga.

O valor considerado para aceleração do sistema foi definido com base em valores empíricos apresentados por [Festo \(2019\)](#). Foi assumido o valor de 6 m/s^2 , uma vez que o braço robótico utiliza servomotores para movimento das suas articulações.

Como recomendado por diferentes fabricantes, foi utilizado um fator de segurança de 2, uma vez que são realizados movimentos rotacionais.

De seguida são apresentados os cálculos efetuados, bem como os componentes selecionados a partir do catálogo do fabricante.

4.3.3.1 Seleção das ventosas

Uma vez conhecida a massa da peça a manusear, pode selecionar-se o tipo de ventosa a utilizar. De acordo com as características da superfície, optou-se por ventosas de 1,5 foles, uma vez que atuam como compensadoras de altura e de declive, permitindo uma melhor adaptação à superfície da peça. Quanto ao material da ventosa, consultando a tabela de materiais disponibilizada por [Festo \(2011\)](#), foi selecionada a borracha nitrílica (NBR), que apresenta propriedades satisfatórias, sendo também um material mais económico.

4.3.3.2 Cálculo de forças

O passo seguinte passou pelo cálculo da força teórica de retenção (F_{TR}). De forma a garantir a manipulação segura da peça durante todo o processo e considerando os movimentos a realizar pelo braço robótico, foi selecionado o Cenário 3, apresentado na Figura 2.17. Quanto ao coeficiente de atrito, foi usado o valor de referência de 0,5 para superfícies metálicas sem óleos.

Utilizando a Equação 2.3 a força teórica de retenção toma o valor de 253 N, o que significa que a força de sucção fornecida pelas ventosas deverá ser superior este valor. Com base na superfície da peça, foi considerada a utilização de ventosas com um diâmetro de 40 mm, o que permite obter uma força de sucção mínima de 52,3 N por ventosa, conforme assinalado na Tabela 4.5. Deste modo, foram selecionadas 5 ventosas com 40 mm de diâmetro, obtendo-se uma força de sucção total de 261,5 N para um nível de vácuo de -0,7 bar.

Tabela 4.5: Dimensões e características das ventosas de 1,5 foles disponíveis (Festo, 2015).

Suction cup shape		Suction cup $\varnothing$ [mm]			
		20	30	40	50
B – round, bellows 1.5 convolutions: material NBR, VMQ (silicone), PUR, Vulkollan® (technical values in brackets)					
	Connection suction cup holder	M6	M6	M6	M6
	Nominal width [mm]	3	3	3 (2.5)	3 (2.5)
	Holding force at nominal operating pressure –0.7 bar [N]	12.9	26.2	52.3 (59)	72.6 (100)
	Suction cup volume [cm ³]	1.6	4.07	8.87 (9.8)	14.23 (17.6)
	Min. workpiece radius [mm]	40	80	90 (35)	150 (40)
	Height compensator [mm]	6	8	9.5 (9)	11 (10)
	Weight [g]	6.7	9.9	18.7 (18)	24.7 (24)

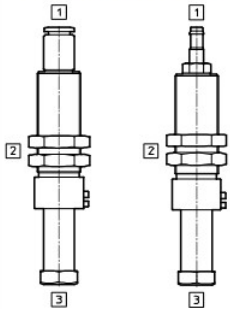
4.3.3.3 Seleção dos elementos de montagem

Com base no diâmetro das ventosas foram selecionados os seguintes elementos de montagem:

- Compensadores de altura: curso 20 mm;
- Compensadores angulares: $\pm 15^\circ$;
- Suportes para ventosas com entrada vertical;
- Acessórios de ligação: conexões rápidas (*push-in connectors*).

Na Tabela 4.6 podem observar-se as características do tipo de suporte selecionado, o qual possui já integrados o compensador de altura e o acessório para ligação do vácuo.

Tabela 4.6: Características dos suportes selecionados para as ventosas (Festo, 2015).

HCL – Vacuum port on top, mounting with lock nut, with long height compensator			
	Mounting thread [2]	M14x1	
	Suction cup mounting [3]	M6	
	Nominal width [mm]	3.4	
	Volume [cm ³]	1.78	
	Height compensator [mm]	20	
	Spring force (normal/min. length) [N]	1/9	
	Ambient temperature [°C]	0 ... +60	
	Weight [g]	47	
	Materials-holder	Tempered steel, high-alloy steel, POM	
	Materials-seals	NBR, steel	
Note on materials		RoHS-compliant	

4.3.3.4 Gerador de vácuo

Devido à existência de uma rede de ar comprimido junto ao equipamento a automatizar, optou-se por utilizar válvulas geradoras de vácuo. Para implementação foram consideradas duas possibilidades distintas:

- Utilizar uma geradora (OVEM-14-H) para todas as ventosas: geradora compacta e controlável, com sensor de vácuo incluído - apresenta um custo elevado;

- Utilizar uma geradora (VN-05-M) para cada ventosa: geradoras *in-line* simples, sem dispositivos de controlo - apresentam menor custo e podem ser acopladas diretamente às ventosas.

Para a determinação do volume a evacuar, foi considerado o volume interno das ventosas, dos elementos de montagem e da tubagem. Na Tabela 4.7 podem verificar-se os valores obtidos para o volume a evacuar e o tempo de ciclo para cada uma das possibilidades. O tempo de evacuação e o tempo de descarga foram obtidos a partir do catálogo disponibilizado por Festo (2011), considerando um nível de vácuo de -0,8 bar. O tempo de manuseamento e o tempo de retorno foram estimados a partir dos valores de referência de velocidade do braço robótico apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.7: Volume a evacuar e tempo de ciclo do sistema de vácuo.

Válvula geradora	VN-05-M	OVEM-14-H
Volume do sistema		
Volume das ventosas (cm^3)	8,87	44,35
Volume dos elementos de montagem (cm^3)	1,78	8,90
Volume da tubagem (cm^3)	-	18,85
Volume total (cm^3)	10,65	72,10
Tempo de ciclo		
Tempo de evacuação, t_E (s)	0,60	0,36
Tempo de movimentação em carga, t_1 (s)	7,00	7,00
Tempo de descarga, t_S (s)	0,10	0,03
Tempo de movimentação em vazio, t_2 (s)	7,00	7,00
Tempo de ciclo, T_c (s)	14,70	14,39

Ambas as geradoras apresentam um tempo de evacuação e de descarga muito baixos quando comparando com o tempo de movimentação do sistema. Desta forma, não existe uma diferença significativa entre o tempo de ciclo obtido com cada uma das geradoras. É ainda de notar que o tempo de ciclo do sistema de vácuo é ainda muito menor que o valor estabelecido na Tabela 4.4.

Foi ainda realizada uma avaliação quanto aos custos e consumos relacionados com cada uma das geradoras (Tabela 4.8). O consumo de ar comprimido foi obtido através do catálogo do fabricante (Festo, 2011). Foi ainda assumido um custo de $0,02 \text{ €/m}^3$ ¹.

As duas geradoras apresentam resultados distintos quanto à sua economia. A geradora OVEM possui uma válvula de retenção que mantém o vácuo após a geradora ser desligada, evitando o consumo de ar comprimido durante o transporte da peça. A geradora VN não possui esta função, estando continuamente em funcionamento. Verifica-se por isso, um consumo de ar comprimido significativamente maior com as geradoras VN devido ao elevado tempo para movimentação da peça.

Para além do maior consumo de ar, a utilização de uma geradora VN para cada ventosa implica utilizar um sensor de vácuo para cada uma delas, sendo ainda necessário adquirir a válvula

¹Valor de referência para uma pressão de 7 bar, com um custo de energia elétrica de $0,10 \text{ €/kWh}$. Inclui material, depreciação e custos de operação.

Tabela 4.8: Consumo de ar comprimido das geradoras e custos associados.

Válvula geradora	VN-05-M	OVEM-14-H
Consumo de ar do gerador (l/min)	11,50	117,00
Consumo de ar total por ciclo (l)	7,28	0,70
Ciclos/hora	76,60	76,60
Consumo de ar ($l/hora$)	557,61	53,84
Custo de energia anual (€)	91,27	8,81
Custo geradoras (€)	78,04	433,64
Custo sensores de vácuo (€)	192,88	-
Custo válvula solenóide (€)	37,69	-

solenóide em separado. Por outro lado, a geradora OVEM apesar de apresentar maior custo, inclui já estes componentes, o que permite obter um sistema de vácuo mais simples e compacto.

Efetuada-se uma análise dos custos envolvidos, verificou-se que a geradora OVEM constitui a melhor opção, pois o investimento inicial adicional poderá ser amortizado em 1,52 anos.

4.3.3.5 Análise experimental

Para uma maior proximidade do dimensionamento realizado com as características do processo real, foi realizada uma demonstração dos componentes e verificada a sua adequabilidade (Figura 4.13).

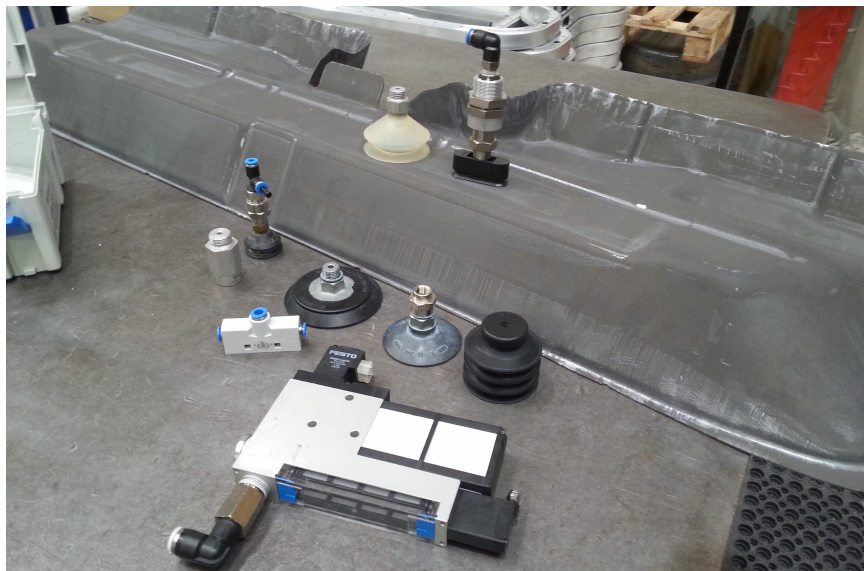


Figura 4.13: Demonstração dos componentes para o sistema de vácuo.

Com análise efetuada foi possível concluir que a superfície da peça permitia acomodar ventosas com 50 mm de diâmetro. Refazendo os cálculos, verificou-se que é possível utilizar apenas 4 ventosas que exercem uma força de sucção de 290,4 N. Desta forma, com o aumento da área de cada ventosa, foi possível reduzir o número de componentes utilizados na garra, e assim reduzir os custos e peso envolvidos.

Foi ainda aconselhado por parte do fornecedor a utilização de uma válvula anti retorno para cada uma das ventosas. Assim, caso uma das ventosas não encoste por completo na peça, é possível que as restantes atinjam o nível de vácuo desejado e assim agarrar a peça.

4.3.4 Material selecionado e modelo final

Uma vez estudados os componentes a utilizar na garra, procedeu-se à análise das características técnicas e custos dos componentes disponíveis no mercado. Na Figura 4.9 são apresentados os materiais necessários para a estrutura da garra. Considerando o custos dos componentes e da matéria prima para o fabrico da flange, é possível estimar um custo de 190,00 € para a estrutura da garra.

Tabela 4.9: Materiais selecionados para a estrutura da garra.

Componente	Marca/referência	Massa/unid (g)	Descrição	Qtd.
	Item/Europneumaq 0.0.370.03	480,0	Perfil de alumínio 20x20 mm	2,6
	Item/Europneumaq 0.0.370.03	1,2	Tampa para perfil de alumínio 20x20 mm	8
	Item/Europneumaq 0.0.425.11	2,0	T-Slot Nut 5 St M5	6
	Item/Europneumaq 0.0.370.03	2,8	Parafuso cabeça cônica sextavado interior M5x18 - DIN 7991	6
	Item/Europneumaq 0.0.437.83	4,0	Angle Hinge Bracket 5	4
	Quantal	301,7	Flange ligação garra - robô	1
	Quantal	-	Cavilha com rosca Ø6x16 - DIN 7979 h6	1
	Quantal	-	Parafuso cabeça cilíndrica sextavado interior M6x16 - DIN 912	4

Quanto ao sistema de vácuo, após análise e contacto com diferentes fornecedores, foi possível obter duas alternativas para o custo dos componentes. Na Tabela 4.10 é apresentada a listagem dos materiais para a alternativa A. Os componentes representam um custo total de 1 158,20 €.

Na Tabela 4.11 podem observar-se os materiais que constituem a alternativa B. Esta representa um custo total de 1 080,19 €.

Para além do custos envolvidos é ainda necessário considerar a massa dos componentes. A alternativa A permite obter uma garra com uma massa de 2,4 kg, enquanto que com a alternativa B

Tabela 4.10: Alternativa A para os materiais do sistema de vácuo da garra.

Componente	Marca/referência	Massa/unid (g)	Descrição	Qtd.
	FESTO 189176	71,7	Conjunto ventosa ESG-50-BN-HCL-QS	4
	FESTO 539997	380	Geradora de vácuo OVEM-14-H	1
	FESTO 153042	-	Acessório ligação rápida QS-8H-6	10
	FESTO 153150	-	Acessório ligação rápida QSY-8	10
	FESTO 567844	-	Cabo de conexão NEBU-M12W5-K-5- LE5	1
	FESTO 551457	-	Tubo flexível PEN-6X1-BL	50
	FESTO 551458	-	Tubo flexível PEN-8X1,25-BL	50
	FESTO 191206	19	Compensador angular ESWA-4	4
	Piab/Teclena 0200449	45	Acessório para ligação ventosas/perfil	4

se obtêm uma massa de 2,8 kg. Assim, uma vez que a diferença de preço não é relevante, optou-se pela alternativa A.

Perante a alternativa selecionada, foi possível completar o modelo da garra, apresentado na Figura 4.14, no qual se pode observar a sua orientação em relação à peça.

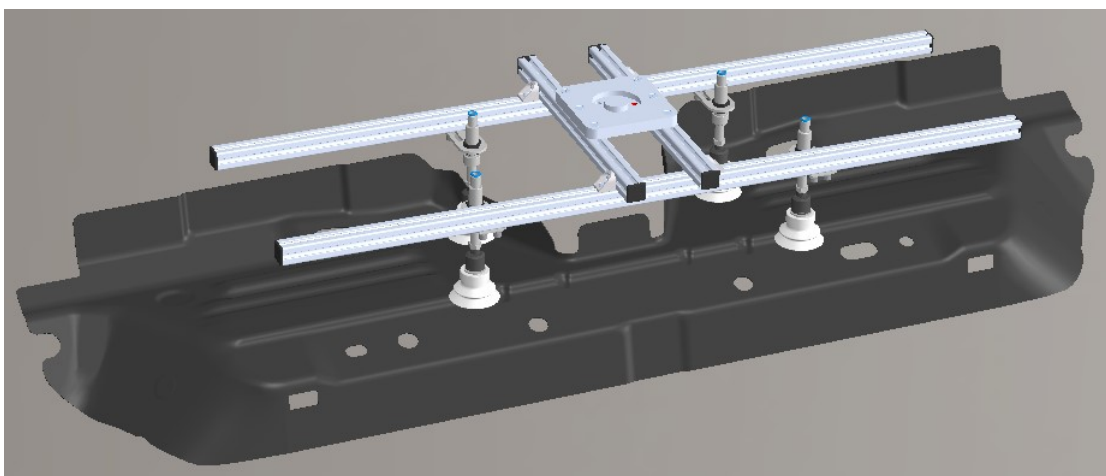


Figura 4.14: Modelo final da garra e posicionamento em relação à peça.

Tabela 4.11: Alternativa B para os materiais do sistema de vácuo da garra.

Componente	Marca/referência	Massa/unid (g)	Descrição	Qtd.
	Schmalz/FALEX 10.01.06.00851	42,2	Ventosa 50 mm	4
	Schmalz/FALEX 10.01.03.00110	67	Compensador angular	4
	Schmalz/FALEX 10.01.02.00567	145	Compensador de altura	4
	Schmalz/FALEX 10.09.03.00054	240	Distribuidor de vácuo	1
	Schmalz/FALEX 10.08.06.00045	21	Parafuso de vedação 3/8"	1
	Schmalz/FALEX 10.08.06.00044	13	Parafuso de vedação 1/4"	4
	Schmalz/FALEX 10.08.03.00086	70	Suporte para ventosa	4
	Schmalz/FALEX 10.02.02.04376	165	Geradora de vácuo	1
	Schmalz/FALEX 10.02.02.04343	-	Suporte de fixação	1
	Schmalz/FALEX 21.04.06.00086	-	Cabo de conexão	1
	Schmalz/FALEX 10.07.01.00119	47	Filtro	1
	FALEX C02250618	-	Acessório ligação rápida 1/8"	4
	FALEX PU2-0506100	-	Tubo flexível 6 mm	3
	FALEX C02250628	-	Acessório ligação rápida 1/4"	4
	FALEX C02250838	-	Acessório ligação rápida 3/8"	3
	FALEX PU2-0508100	-	Tubo flexível 8 mm	3

4.4 Detecção da furação da peça

Como mencionado na solução proposta, pretendeu-se retirar a etapa de verificação dos furos do programa de corte. Para tal, considerou-se que essa verificação poderia ser feita através da integração de sensores na garra do braço robótico ou pela criação de um painel/bancada no qual o robô coloca a peça para verificação. Entre as duas possibilidades consideradas optou-se pela primeira.

A principal vantagem da abordagem selecionada é que a deteção dos furos pode ser efetuada durante a movimentação da peça, evitando assim o aumento do tempo de manuseamento da peça. Contudo, a adição de mais componentes à estrutura da garra irá aumentar o peso da mesma, e consequentemente reduzir a capacidade de carga. Assim, nesta etapa de projeto procurou-se seleccionar os componentes de modo a obter a melhor relação entre peso, custo e aplicabilidade na garra.

Para cada um dos 10 furos da peça é necessário um sensor de deteção e respetivos elementos de suporte que, por sua vez, são conectados aos perfis da estrutura. Foi considerada a utilização dos seguintes mecanismos de deteção:

- **Detetores fotoelétricos de reflexão difusa:** acionamento por interrupção do feixe da radiação emitida; possuem o emissor e o recetor integrados no mesmo componente; apresentam o custo mais elevado;
- **Interruptores fim de curso:** são acionados por contacto mecânico; são os mais económicos;
- **Detetores de proximidade indutivos:** acionamento por deteção quando um objeto metálico entra no seu campo magnético; apresentam um custo intermédio entre os anteriores.

Inicialmente procurou-se utilizar os sensores indutivos devido ao seu menor custo em relação aos sensores fotoelétricos, no entanto, o seu corpo metálico iria aumentar significativamente o peso da garra. Uma outra desvantagem é o curto alcance de deteção, sendo necessário colocar os sensores demasiado próximos dos furos, o que por sua vez implicaria colocar acessórios de suporte com maiores dimensões.

Os sensores fotoelétricos são mais leves e apresentam maior flexibilidade, uma vez que possuem elevadas distâncias de deteção e a emissão de um feixe de secção reduzida. Esta característica permite que estejam mais próximos da estrutura da garra, e assim utilizar elementos de suporte mais leves.

Os sensores de fim de curso, devido ao acionamento mecânico, estão fortemente dependentes da precisão do braço robótico e do posicionamento da peça, revelando-se por isso a opção menos adequada. Desta forma, apesar do seu custo mais elevado, optou-se por utilizar sensores fotoelétricos.

Apesar da variedade de produtos existente, verificaram-se dificuldades na compatibilidade dos mesmos com esta aplicação. Estas dificuldades foram devidas à posição dos furos em relação à estrutura da garra, o que exigiu a utilização de acessórios de suporte com flexibilidade suficiente para se obter o alinhamento dos sensores com os furos.

Após análise e contacto com diferentes fornecedores, foram selecionados os materiais que melhor se adequam a esta aplicação. De seguida são apresentadas duas alternativas para a aquisição dos componentes.

Na Tabela 4.12 podem verificar-se os componentes que compõem a alternativa A. Estes componentes apresentam uma massa total de 740 gramas, a incluir no peso da garra, e um custo de 1376,99 €.

Tabela 4.12: Alternativa A para os materiais para a verificação dos furos da peça.

Componente	Marca/referência	Massa/unid (g)	Descrição	Qtd.
	Baumer/InfoControl OR18.GR-PW1P.71O	30,0	Sensor fotoelétrico de reflexão difusa - alcance 120 mm	10
	Baumer/InfoControl 10151658	44,0	Suporte para sensor	10

A segunda opção (alternativa B) é composta pelos materiais apresentados na Tabela 4.13. A utilização destes componentes traduz-se numa massa de 782,4 gramas e num custo de 662,63 €.

Tabela 4.13: Alternativa B para os materiais para a verificação dos furos da peça.

Componente	Marca/referência	Massa/unid (g)	Descrição	Qtd.
	IFM O8T-HPKG	38,2	Sensor fotoelétrico de reflexão difusa - alcance 180 mm	10
	IFM E21289	11,9	Suporte para sensor	8
	IFM E21081	102,0	Varão para extensão do sensor	2
	IFM E21298	50,6	Suporte para sensor	2

Com a primeira opção é possível obter uma massa ligeiramente menor do que com a segunda, contudo optou-se pela alternativa B, uma vez que apresenta um custo significativamente menor e os sensores fotoelétricos apresentam maior alcance de deteção. Obtém-se assim uma massa total da garra de 3,2 kg, o que permite que o braço robótico movimente peças até 6,8 kg.

4.5 Transportadores

Os transportadores representam o fator chave para tornar o sistema autónomo, dependendo da sua capacidade. Para a aplicação em estudo pretendeu-se a existência de uma autonomia de cerca de uma hora, de modo a compensar atrasos do operador na realização das tarefas e as pausas para almoço. Os transportadores a utilizar são idênticos, tendo sido considerado que cada um deles deveria ter capacidade para 38 peças.

4.5.1 Seleção

Para a seleção do tipo de transportador mais adequado, foram consideradas as características dos transportadores mais comuns e os fatores para a sua seleção, abordados na secção 2.3.1.

Tal como na garra do braço robótico, pretendeu-se também que os transportadores possuíssem flexibilidade para movimentar diferentes peças e que eventualmente possam ser utilizados noutros processos.

Adicionalmente, as peças a transportar deverão estar sempre com a mesma orientação e espaçamento entre elas, de modo a que o braço robótico agarre a peça sempre nas mesmas condições. Para este efeito os transportadores de correia dentada ou os transportadores de corrente revelam-se mais adequados, uma vez que o mercado disponibiliza correias e correntes que permitem a conexão de elementos de suporte para as peças.

Um outro fator considerado foi a capacidade de carga do transportador. As 38 peças a colocar em cada um dos transportadores correspondem a uma massa de 152 kg. Desta forma, optou-se por utilizar transportadores de corrente, uma vez que conferem maior robustez, permitindo suportar cargas mais elevadas do que os transportadores de correia.

4.5.2 Dimensionamento e seleção das correntes

A definição do tipo de configuração do transportador é o primeiro passo para o dimensionamento das correntes a utilizar. Optou-se por utilizar correntes de rolos, uma vez que permitem reduzir significativamente o atrito, e assim reduzir a força de tração aplicada e o desgaste. Sendo as peças transportadas pelas correntes através de suportes, foi selecionada a configuração representada na Figura 2.27.

O cálculo da máxima tensão de tração aplicada na corrente ocorreu em duas fases. Numa primeira fase realizou-se um cálculo preliminar, com determinadas considerações, de modo a definir o tamanho da corrente. Na segunda fase, foi efetuada uma confirmação do cálculo preliminar, com base na corrente identificada.

Na fase de cálculo preliminar foram utilizados os valores apresentados na Tabela 4.14. O passo da corrente foi definido com base no comprimento máximo do transportador e no número de peças, pretendendo-se colocar uma peça por cada passo da corrente. Procurou-se utilizar o maior passo possível, de modo a reduzir o número de componentes por unidade de comprimento. A massa da corrente, dos elementos de suporte e o coeficiente de atrito representam valores estimados. O fator

de serviço (F_S) foi obtido com base nas condições de operação mencionadas na Tabela 2.6. Quanto ao coeficiente de atrito nas rodas (F_A) foi considerado o valor recomendado pelo fabricante.

Tabela 4.14: Valores definidos na fase preliminar de cálculo.

N.º de peças	38
Massa das peças, P_1	152 kg
Comprimento máx. do transportador	2 m
N.º de correntes, N	2
Passo da corrente	50 mm
Massa da corrente	2 kg/m
Massa dos acessórios de transporte	0,040 kg/unid.
Massa dos suportes	0,500 kg/unid.
Massa total das correntes, P	117,9 kg
Coeficiente de atrito, f_2	0,2
Fator de serviço, F_S	1,8
Coeficiente de atrito nas rodas, F_A	1,05

Utilizando a equação 2.6, a tensão de tração da corrente assume o valor de 500,4 N. Multiplicando este valor pelo coeficiente de segurança recomendado de 8, obtém-se a tensão de rotura mínima da corrente de 4003,2 N.

Recorrendo ao catálogo do fabricante, com base na tensão de rotura, foi selecionada uma corrente transportadora com as características apresentadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Características da corrente transportadora selecionada (ZMC, 2019).

Passo	50 mm
Tensão de rotura	16 000 N
Massa da corrente	1,4 kg/m
Massa dos elementos de ligação	0,070 kg/unid.
Diâmetro exterior da bucha, d	8,4 mm
Diâmetro exterior do rolo, D	25 mm

A partir da corrente selecionada foi possível calcular o coeficiente de atrito f_2 , recorrendo à equação 2.4. Foi assumido o valor 1 para o coeficiente b , considerando superfícies lisas. O coeficiente C foi consultado na Tabela 2.5. Obteve-se assim um novo valor para o coeficiente de atrito f_2 de 0,12.

Calculando novamente a tensão aplicada na corrente, obtém-se 310,3 N. A tensão mínima de rotura é de 2482,0 N, valor bastante inferior à tensão de rotura da corrente selecionada.

De modo a verificar a adequabilidade da corrente foi ainda calculada a pressão exercida nos rolos (Tabela 4.16). Verifica-se que a pressão exercida no rolamento é bastante inferior ao valor de 1,2 MPa, indicado pelo fabricante. Assim, pode dizer-se que a corrente selecionada cumpre os requisitos da aplicação.

Tabela 4.16: Determinação da pressão exercida nos rolos da corrente.

Peso de cada peça	39,2 <i>N</i>
N.º de rolos a suportar o peso	2
Peso da corrente e suportes em 50 mm	6,3 <i>N</i>
Peso total exercido sobre os rolos	45,5 <i>N</i>
Peso por rolo	22,8 <i>N</i>
Área de rolamento do rolo	88,4 <i>mm</i> ²
Pressão no rolamento	0,26 <i>MPa</i>

4.5.3 Elementos de suporte das peças

Uma vez selecionada a corrente transportadora, foi possível proceder à modelação dos elementos de suporte das peças, com base nos acessórios de ligação integrados na corrente (Figura 4.15).

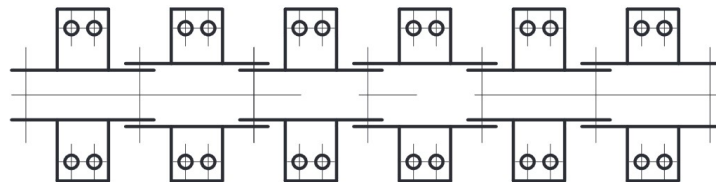


Figura 4.15: Acessórios de transporte da corrente selecionada (ZMC, 2019).

Os elementos de suporte foram modelados em forma de pinça, de modo a permitir o encaixe da peça. Pretendeu-se ainda que a folga entre a "pinça" fosse ajustável. Na Figura 4.16 pode observar-se o modelo 3D do suporte, cujos desenhos de definição são apresentados no Anexo A, nas Figuras A.2 e A.3.

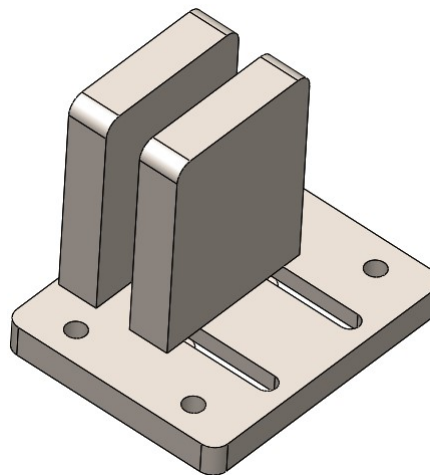


Figura 4.16: Modelo do componente para suporte das peças nos transportadores.

Considerando que os elementos de suporte são fabricados em aço St37, é possível estimar que a massa de cada suporte será de 260 g. Refazendo o cálculo da tensão máxima aplicada na corrente, obtém-se 295,4 N.

4.5.4 Veio de transmissão e carretos

A escolha dos carretos irá definir o binário que o motoredutor terá de aplicar para movimentar as correntes, assim como as tensões de corte a que o veio de transmissão está submetido. Com base no catálogo do fabricante, e a partir da corrente escolhida, foi selecionado um carreto compatível. As suas características são apresentadas na Tabela 4.17 de acordo com a Figura 4.17.

Tabela 4.17: Dimensões do carreto selecionado (Rolisa, 2007).

N. de dentes, Z	6
de (mm)	121,0
dp (mm)	100,0
dm (mm)	58
D1 (mm)	20
A (mm)	40,5
Massa (kg)	1,11

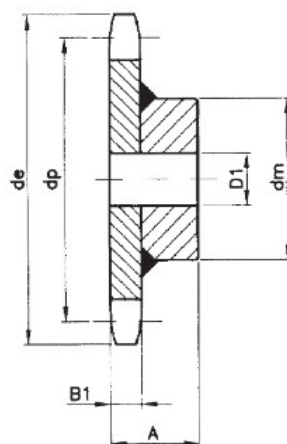


Figura 4.17: Dimensões do carreto selecionado (Rolisa, 2007).

Multiplicando a força a exercer nas correntes pelo raio primitivo do carreto, obtém-se o valor de 29,53 N.m, que representa o binário a aplicar pelo motoredutor e o momento torsor máximo exercido no veio.

A força exercida pelas correntes origina ainda esforços de flexão no veio. Na Figura 4.18 podem observar-se as forças transmitidas pelos carretos (pontos 3 e 4), as reações nos apoios (pontos 2 e 5), bem como o diagrama de momentos fletores resultante. Verifica-se um momento fletor máximo de 12 N.m.

Para realizar o dimensionamento do veio foi considerado o aço AISI 1045, o qual apresenta um módulo de elasticidade transversal (G) de 80 GPa e tensões de cedência (σ_c) e de rotura (σ_r) de 450 e 585 MPa, respetivamente. Na Tabela 4.18 apresentam-se os valores admissíveis para as deformações e para a tensão de corte, obtida através da equação 2.11.

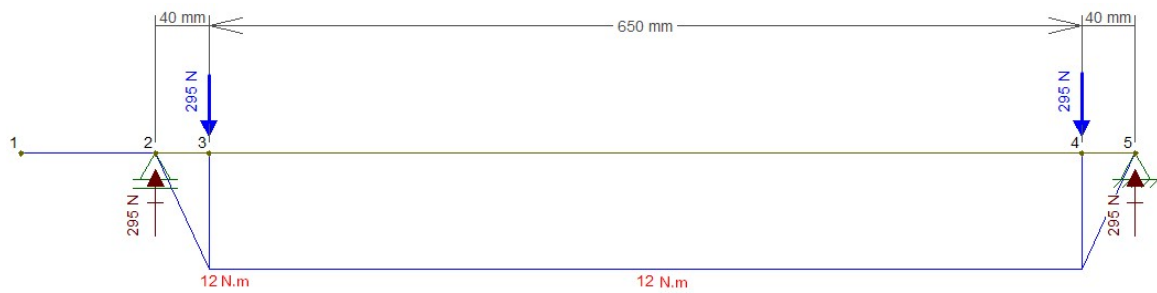


Figura 4.18: Forças exercidas no veio e diagrama de momentos fletores.

Tabela 4.18: Critérios adotados para o dimensionamento do veio (Malça, 2019).

Tensão de corte admissível	78,98 MPa
Flecha máxima	$\frac{1}{1000} \cdot \text{comprimento do vão} = 0,65 \text{ mm}$
Deformação angular máxima	2,5 °/m

Para os fatores K_T e K_F , foi considerado um coeficiente de 1,5, como recomendado em NPTEL (2012). Finalmente, através da equação 2.10, foi possível determinar um diâmetro mínimo do veio de 14,6 mm.

Foi ainda realizada uma verificação às deformações de flexão e de torção. Na Figura 4.19 pode verificar-se a flecha formada no veio, que toma o valor máximo de 0,49 mm, sendo inferior ao da flecha máxima admissível.

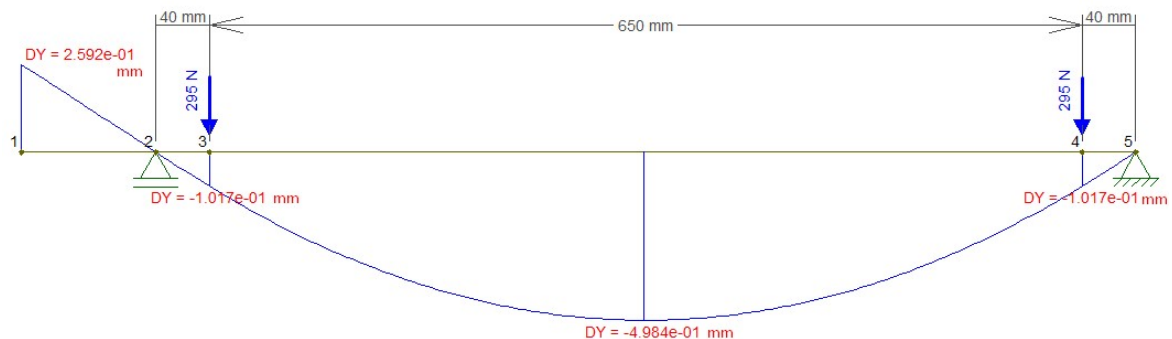


Figura 4.19: Distribuição de flechas no veio.

Quanto à deformação angular, utilizando a equação 2.12 e admitindo um diâmetro de 20 mm obteve-se o valor de 1,35 °/m, também inferior ao valor máximo admissível. Optou-se assim por utilizar um veio com diâmetro 20 mm.

Na Figura A.4, apresentada no Anexo A, pode observar-se o desenho de definição do veio motor, modelado para eventual ordem de fabrico. Foi também concebido o desenho de definição do veio movido, o qual apresenta um diâmetro idêntico ao veio motor (Figura A.5). Para o acoplamento dos carretos aos veios são utilizadas chavetas paralelas ISO/R 773 6x6x25-St, enquanto que para o acoplamento do motoredutor é utilizada uma chaveta paralela ISO/R 773 6X6X70-St.

4.5.5 Chumaceiras

Uma vez determinado o diâmetro do veio, procedeu-se à seleção das chumaceiras que irão suportar os veios do transportador. Na Tabela 4.19 pode verificar-se as características da chumaceira selecionada, de acordo com a Figura 4.20.

Tabela 4.19: Características da chumaceira selecionada para suporte dos veios (NTN, 2011).

Shaft dia.	Unit number ¹⁾	Nominal dimensions											Bolt size	Bearing number ¹⁾
		mm						inch						
		<i>H</i>	<i>J</i>	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₁	<i>A</i>	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>A</i> ₀	<i>B</i>	<i>S</i>			
mm inch												mm inch		
15 9/16 5/8	ASFB202D1 ASFB202-009D1 ASFB202-010D1	81 3 3/16	63.5 2 1/2	9.5 3/8	9.5 3/8	18 23/32	7 9/32	56 2 7/32	25.5 1	22 0.8661	6 0.236	M6 1/4	AS202D1 AS202-009D1 AS202-010D1	
17 1 1/16	ASFB203D1 ASFB203-011D1	81 3 3/16	63.5 2 1/2	9.5 3/8	9.5 3/8	18 23/32	7 9/32	56 2 7/32	25.5 1	22 0.8661	6 0.236	M6 1/4	AS203D1 AS203-011D1	
20 3/4	ASFB204D1 ASFB204-012D1	90 3 5/8	71.5 2 13/16	11 7/16	11 7/16	20 25/32	10 25/64	61 2 13/32	29 1 9/64	25 0.9843	7 0.276	M8 5/16	AS204D1 AS204-012D1	
25	ASFB205D1D1	95	76	11	11	20	10	64	30.5	27	7.5	M8	AS205D1	

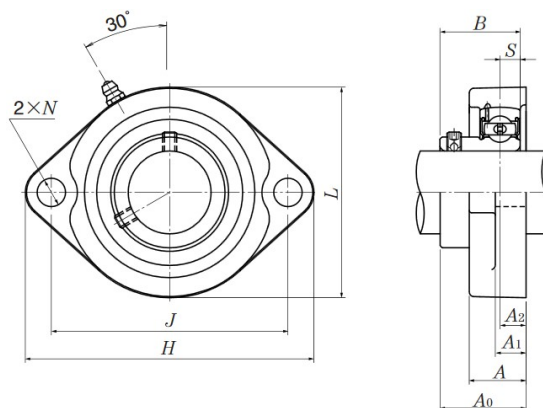


Figura 4.20: Características da chumaceira selecionada para suporte dos veios (NTN, 2011).

Para a seleção da chumaceira foi ainda analisada a capacidade de carga, considerando-se a carga estática, devido à baixa velocidade de rotação do veio. Através da Figura 4.18 pode verificar-se que é exercida uma força de 295 N em cada um dos apoios. Por sua vez, a chumaceira suporta 6650 N, obtendo-se assim um fator de segurança de 22,5.

4.5.6 Motoredutor

Para a seleção do motoredutor foram considerados os requisitos mínimos apresentados na Tabela 4.20. Através da equação 2.10 foi possível determinar o binário máximo aplicável no veio.

A velocidade do transportador é relativamente baixa, uma vez que se pretende que as correntes avancem 50 mm num máximo de 40 segundos. Em consequência, obteve-se uma baixa velocidade de rotação e potência. Desta forma, em função do binário pretendido, foi selecionado um motoredutor com a menor potência e velocidade de rotação. Na Tabela 4.21 podem verificar-se as principais características do motoredutor selecionado.

Tabela 4.20: Requisitos definidos para a seleção do motoredutor.

Binário mínimo	29,53 N.m
Binário máximo	81,83 N.m
Velocidade de rotação mínima	0,24 rpm
Potência mínima	0,738 W

Tabela 4.21: Principais características do motoredutor selecionado (NORD, 2019).

Potência	0,12 kW
Velocidade de rotação à saída	28 rpm
Binário de saída	40,9 N.m
Razão de transmissão	47,67
Massa	8 kg

O motoredutor selecionado vem ainda equipado com um encoder. Este dispositivo irá permitir controlar o avanço das correntes e assim o posicionamento das peças.

4.5.7 Estrutura

Em função dos componentes até ao momento definidos, foi possível realizar o dimensionamento da estrutura do transportador. Na Figura 4.21 está representada a estrutura base do transportador.

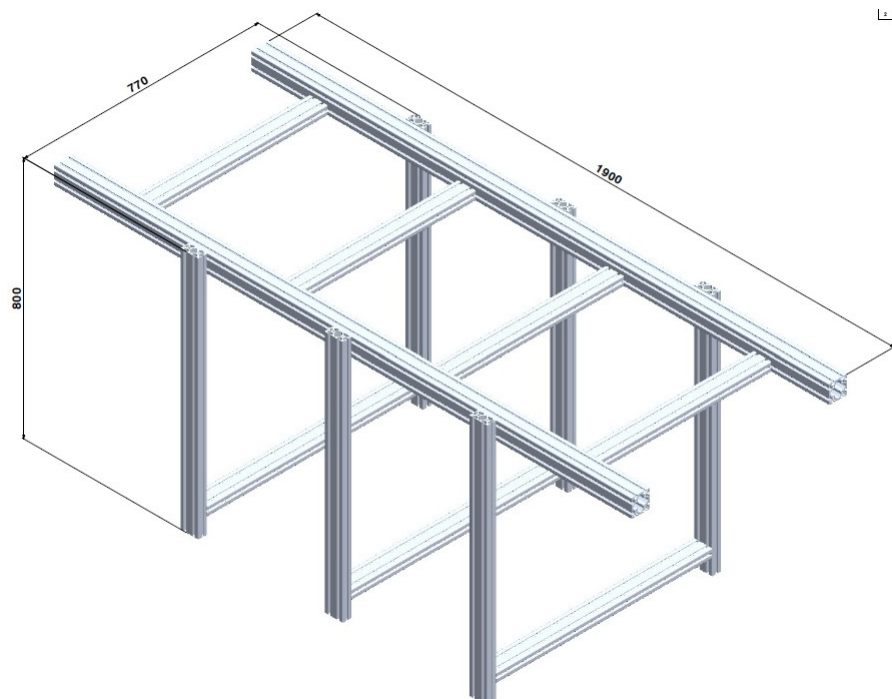


Figura 4.21: Estrutura base do transportador.

Uma vez mais, foram utilizados perfis estruturais em liga de alumínio, devido à facilidade de montagem e conexão dos diferentes elementos. Nos perfis de maior dimensão, que suportam diretamente a carga foi utilizada uma secção de 60x60 mm, enquanto para os restantes foi utilizada uma secção de 60x30 mm. Com base na massa das peças a transportar e nos diversos componentes, foi considerado o valor máximo de 290 kg.

De modo a obter uma análise estrutural, foi efetuada uma simulação numérica da estrutura desenvolvida. A distribuição de tensões na estrutura pode observar-se na Figura 4.22. Na Figura 4.23 está representada a distribuição de flechas. Podem verificar-se tensões máximas de 7,1 MPa, valores significativamente inferiores à tensão de cedência do material (195 MPa). Quanto à flecha máxima, é atingido o valor máximo de 0,33 mm nas extremidades dos perfis nos quais a carga é aplicada.

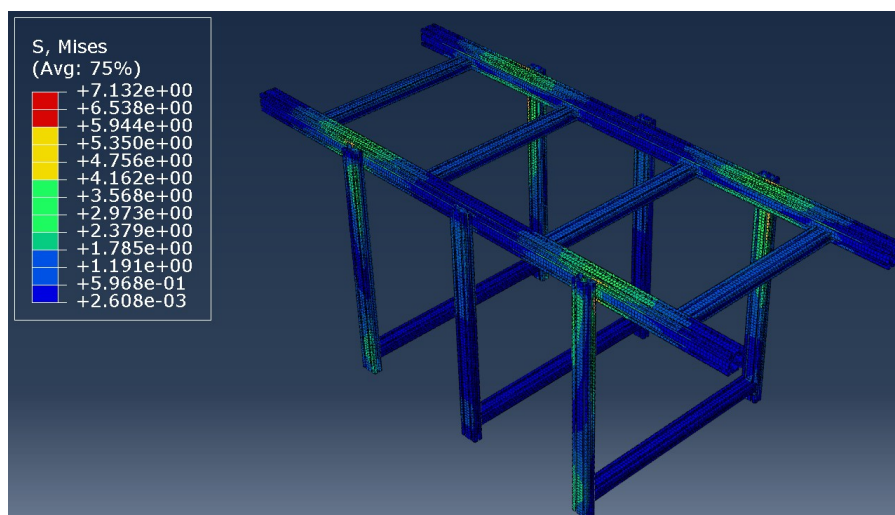


Figura 4.22: Distribuição de tensões na estrutura do transportador.

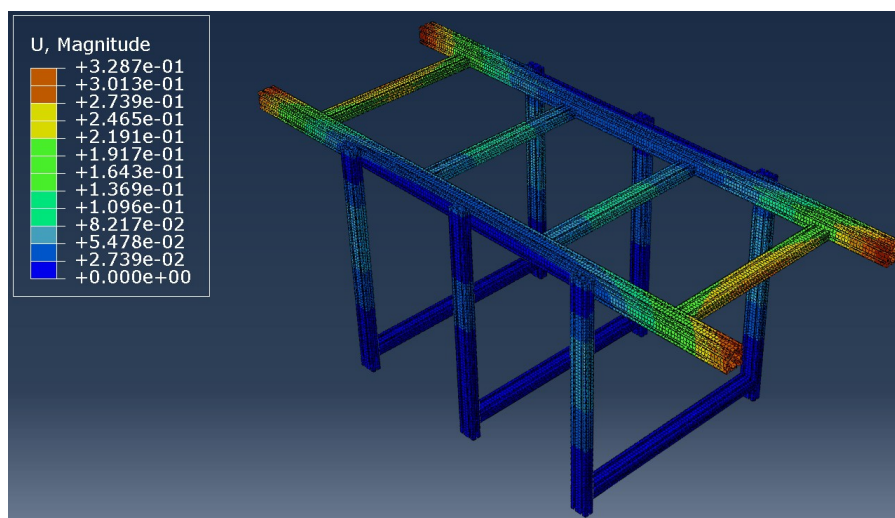


Figura 4.23: Distribuição de flechas na estrutura do transportador.

Pode assim assumir-se que a estrutura se adequa às condições impostas, no entanto, esta poderia ainda ser alvo de otimização, através da redução do tamanho da secção dos perfis verticais.

4.5.7.1 Elementos de suporte e proteção

Procedeu-se ainda à modelação dos suportes para fixação das chumaceiras à estrutura do transportador (Anexo A, Figura A.6). De forma a conferir maior segurança ao transportador, estes suportes envolvem toda a área dos carretos e a zona engrenamento das correntes. Por este motivo foram também desenvolvidas chapas de proteção para as faces opostas dos carretos, como mostra o desenho de definição apresentado no Anexo A, na Figura A.7.

4.5.8 Tensionamento das correntes

De modo a efetuar o tensionamento da corrente é necessário utilizar um mecanismo que permita a translação do veio movido. Para tal, procurou-se utilizar componentes já existentes no mercado, no entanto estes não eram compatíveis com esta aplicação. Desta forma procedeu-se à modelação de um tensor de corrente que permite movimentar todo o suporte da chumaceira, continuando a garantir a proteção na zona dos carretos.

Na Figura 4.24 pode observar-se o modelo do tensor de corrente desenvolvido. Os respetivos desenhos de definição são apresentados no Anexo A, nas Figuras A.8 e A.9. O tensor desenvolvido permite aplicar um deslocamento máximo de 55 mm.

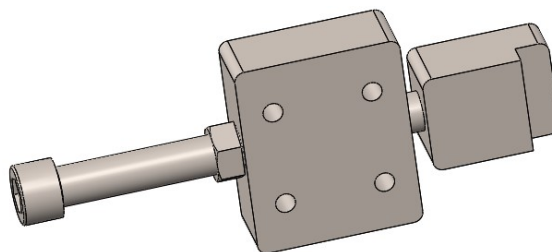


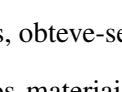
Figura 4.24: Modelo do tensor de corrente desenvolvido.

Quanto à folga da corrente, como mencionado na secção 2.3.3.4, deverá ser de pelo menos 3 % da distância entre os centros dos carretos. Assim, considerando a máxima distância entre carretos permitida pelos tensores de corrente, a folga "vertical" da corrente deverá ser de 62,6 mm.

4.5.9 Material selecionado e modelo

Após o estudo e análise das características dos componentes necessários para a construção do transportador, foi elaborada a lista de materiais. Na Tabela 4.22 são apresentados os materiais para a estrutura do transportador. A totalidade dos componentes representa um custo de 1 382,31 €.

Tabela 4.22: Materiais selecionados para a estrutura do transportador.

Componente	Marca/referência	Descrição	Qtd.
	Item/Europneumaq 0.0.419.03	Perfil de alumínio 60x60	3,8
	Item/Europneumaq 0.0.419.02	Perfil de alumínio 60x30	10,1
	Item/Europneumaq 0.0.419.06	Perfil de alumínio 30x30	0,24
	Item/Europneumaq 0.0.419.67	Angle Bracket Set 6 30x30	64
	Item/Europneumaq 0.0.419.23	Tampa para perfil de alumínio 60x30	10
	Item/Europneumaq 0.0.419.22	Tampa para perfil de alumínio 30x30	4
	Item/Europneumaq 0.0.439.75	T-Slot Nut 6 St M6	40
	Item/Europneumaq 8.0.001.20	Parafuso cabeça cilíndrica sextavado interior M6x30 - DIN 912	8
	Item/Europneumaq 0.0.655.09	Parafuso cabeça cilíndrica sextavado interior M6x16 - DIN 912	32
	Item/Europneumaq 0.0.439.29	Pé para estrutura	6
	Item/Europneumaq 0.0.439.16	Base para pé de estrutura	6

Os restantes componentes que constituem o transportador são apresentados na Tabela 4.23. Considerando o custo dos componentes a adquirir e da matéria prima para fabrico dos componentes desenvolvidos, obteve-se um custo total de 1 461,02 €.

Com base nos materiais selecionados e obtidos os respetivos modelos 3D facultados pelos fabricantes, procedeu-se à modelação do transportador (Figura 4.25). Não tendo sido obtidos os ficheiros 3D das correntes e dos carretos, não foi possível inclui-los no modelo do transportador.

Tabela 4.23: Materiais selecionados para integração na estrutura do transportador.

Componente	Marca/referência	Descrição	Qtd.
	NORD SK92072.1A63 IG 42K	Motorreductor	1
	Rolisa P.50 R25 Z=6	Carreto para corrente transportadora	4
	NTN ASFB204D1	Chumaceira	4
	Rolisa T 4.2 C9 A 20	Guia de apoio da corrente	3,8
	Juncor/ZMC 103	Corrente transportadora	10
	Quantal	Suporte para peças	200
	Quantal	Veio motor	1
	Quantal	Veio movido	1
	Quantal	Suporte de chumaceira	4
	Quantal	Chapa de proteção interior	4
	Quantal	Tensor de corrente	2
	IFM O8T-HPKG	Sensor fotoelétrico de reflexão difusa	1
	IFM E21081	Varão para extensão do sensor fotoelétrico	1
	IFM E21298	Suporte para sensor fotoelétrico	1

4.6 Análise de custo da solução e amortização

Como mencionado anteriormente, a implementação desta solução irá permitir libertar tempo de produção ao equipamento de fabrico. Considerando os custos de operação envolvidos e a sua rentabilidade, está associado ao equipamento um ganho de 120,00 € por cada hora de produção.

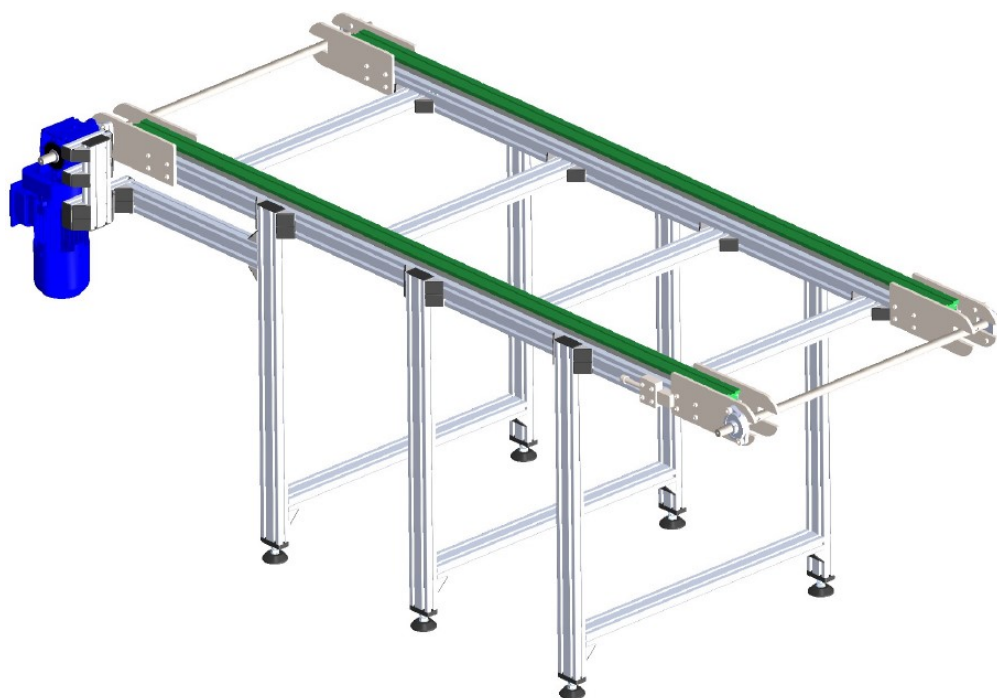


Figura 4.25: Modelo do transportador de corrente desenvolvido.

4.6.1 Verificação dos furos da peça

A verificação dos furos da peça representa uma característica adicional ao sistema de alimentação e recolha das peças. Desta forma, os custos da sua aplicação devem ser analisados separadamente. Na Tabela 4.24, podem verificar-se os custos envolvidos, assim como a produção necessária para a amortização do investimento.

Tabela 4.24: Implementação da verificação dos furos e amortização.

Tempo reduzido por furo	0,2 s
Tempo reduzido ao ciclo de corte	2,0 s
Ganho por peça produzida	0,067 €
Custo de implementação do sistema	662,63 €
Amortização (produção)	9 939 peças

Tendo em conta o volume de produção, a implementação da verificação dos furos representa uma solução vantajosa para a empresa.

4.6.2 Aquisição da solução

Sintetizando os custos envolvidos nos materiais selecionados para a construção da garra do robô e do transportador, obtém-se os valores apresentados na Tabela 4.25. Os custos dos componentes foram consultados considerando as quantidades necessárias para um transportador, pelo que o custo apresentado para os dois transportadores poderá ser menor, caso existam eventuais descontos de quantidade.

Tabela 4.25: Custo total dos componentes para construção da garra do braço robótico e dos transportadores.

Garra		Transportadores	
Estrutura	190,00 €	Estrutura	1 382,83 €
Sistema de vácuo	1 158,20 €	Restantes componentes	1 461,02 €
Verificação de furos	662,63 €	Total	2 843,33 €
Total	2 010,83 €	Total (2 transportadores)	5 686,66 €

Pode assim concluir-se que a implementação do sistema proposto tem um custo global estimado de 7 697,49 €, considerando apenas o custo de aquisição dos materiais.

Procedeu-se à análise da capacidade de produção com processo automatizado e da capacidade de produção atual, tendo sido possível determinar o período de amortização do investimento na aquisição dos materiais (Tabela 4.26). Atualmente, está estabelecida a produção semanal de 5000 peças, no entanto, o cliente pretende o aumento para 8000 peças/semana. Recorrendo aos registos de produção, foi possível verificar uma cadência média de 309 peças/turno. Quanto à cadência do processo automatizado, foi considerada a paragem do equipamento durante 20% do tempo de produção. Neste valor incluem-se as paragens do equipamento para troca do contentor (a cada 130 peças produzidas), a colocação de novas peças nos transportadores e outros fatores que possam provocar a paragem da máquina de corte.

Tabela 4.26: Capacidade de produção do processo atual e do processo automatizado.

Processo	Atual	Automatizado
Tempo de ciclo (s)	47	56,2
Tempo de paragem	$\simeq 45,2\%$	20%
Cadência máxima (peças/semana)	6482	8609
Tempo para produção da quantidade semanal pretendida pelo cliente (dias)	8,6	6,5

Para a implementação da solução proposta é necessário um aumento do tempo de ciclo de 9,2 segundos, no entanto, é ainda possível estimar-se um aumento significativo da cadência de produção. O aumento da cadência deve-se, essencialmente, à diminuição do tempo de paragem do equipamento e ao aumento do tempo de produção de 7,5 horas para as 8 horas de duração do turno, uma vez que a produção é assegurada durante a pausa do operador.

Verifica-se que o processo atual não permite cumprir a produção semanal pretendida pelo cliente. Por outro lado, com a automatização do processo, é possível produzir a quantidade pretendida em menos de uma semana, sobrando ainda 11,9 horas de produção. Este período traduz-se num ganho de 1 426,67 €, o que permite amortizar o investimento dos materiais em apenas 5,4 semanas.

Pode assim concluir-se que, a automatização do processo permite responder às necessidades do cliente e ainda a amortização do investimento num curto período de tempo, apenas com base nas horas de produção restantes.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

Existe uma grande oferta no mercado de soluções chave na mão para os elementos desenvolvidos neste projeto, nomeadamente a garra para o robô e os transportadores, contudo, tratam-se de soluções standard, preparadas para integrar diferentes aplicações, o que se traduz num custo mais elevado. Assim, cada vez mais, as empresas apostam no desenvolvimento de soluções à medida das suas necessidades. A elaboração deste projeto centrou-se desta forma, no desenvolvimento de uma solução à medida, que se dividiu essencialmente em quatro etapas fundamentais: a análise do processo, o estudo da solução proposta, o desenvolvimento da garra para o braço robótico e o desenvolvimento dos transportadores.

A análise do processo representou o ponto de partida para o desenvolvimento de uma solução adequada às necessidades. As observações realizadas durante a fabrico permitiram identificar limitações e detalhes do processo, que à primeira vista não são detetáveis. Esta representou por isso, uma das etapas mais relevantes, permitindo revelar os fatores que provocam a baixa produtividade do equipamento, e assim determinar uma forma eficaz de otimizar o processo.

O processo apresenta elevada dependência do operador, o que provoca a paragem frequente do equipamento. Desta forma, a solução encontrada veio minimizar a intervenção do operador, permitindo a produção autónoma durante 71 minutos.

Relativamente ao desenvolvimento da garra para o robô, procurou-se conferir a maior flexibilidade possível, dentro das limitações impostas pelo braço robótico selecionado. Existe uma grande diversidade de componentes disponíveis no mercado para a construção do tipo de garra selecionado, sendo necessário avaliar as condições de cada aplicação para uma seleção adequada.

O desenvolvimento de transportadores com base nas necessidades do processo, revelou-se uma excelente alternativa, uma vez que permite obter um custo significativamente mais baixo do que a oferta disponibilizada no mercado.

Através dos materiais selecionados, foi possível obter os custos para a aquisição dos mesmos, tendo sido possível, no caso da garra, obter diferentes alternativas para os materiais a adquirir. O valor global obtido constitui um valor de referência para o investimento que seria necessário para implementar o sistema proposto, no entanto, para uma estimativa mais rigorosa deveriam ser considerados outros custos inerentes à implementação. A cadência de produção estimada com a

automatização do processo permite produzir a quantidade estipulada pelo cliente, sobrando ainda um período relativamente elevado para o fabrico de outros produtos. Este período de sobra permite rentabilizar rapidamente o investimento necessário.

Apesar de ser um dos objetivos deste projeto, não foi possível concretizar a implementação do sistema durante o período em que esta dissertação foi realizada. No entanto, inicialmente tinha sido definido um período de um ano para o estudo e implementação de uma solução.

5.1 Trabalho futuro

O conteúdo abordado durante o período de realização desta dissertação representa apenas parte do trabalho que seria necessário até à implementação do sistema. Antes de avançar com uma tomada de decisão sobre a implementação da solução proposta, deveria ainda procurar-se otimizar o projeto desenvolvido até ao momento e considerar os restantes custos envolvidos. Poderiam ter sido consideradas alternativas às soluções desenvolvidas, como é o caso da verificação dos furos da peça através de um painel com sensores de deteção, que eventualmente poderia representar uma alternativa economicamente mais vantajosa.

Uma vez tomada a decisão de implementação do sistema proposto, seria conveniente definir um plano de manutenção, assim como a elaboração de procedimentos de montagem dos componentes, o que seria útil na fase de implementação do sistema.

Por fim, este projeto poderia ter sido desenvolvido tendo em consideração a aplicação futura da marcação CE. A marcação CE permitiria certificar a conformidade do sistema de acordo com as normas europeias e o seu eventual fabrico e comercialização dentro do Espaço Económico Europeu.

Anexo A

Desenhos técnicos

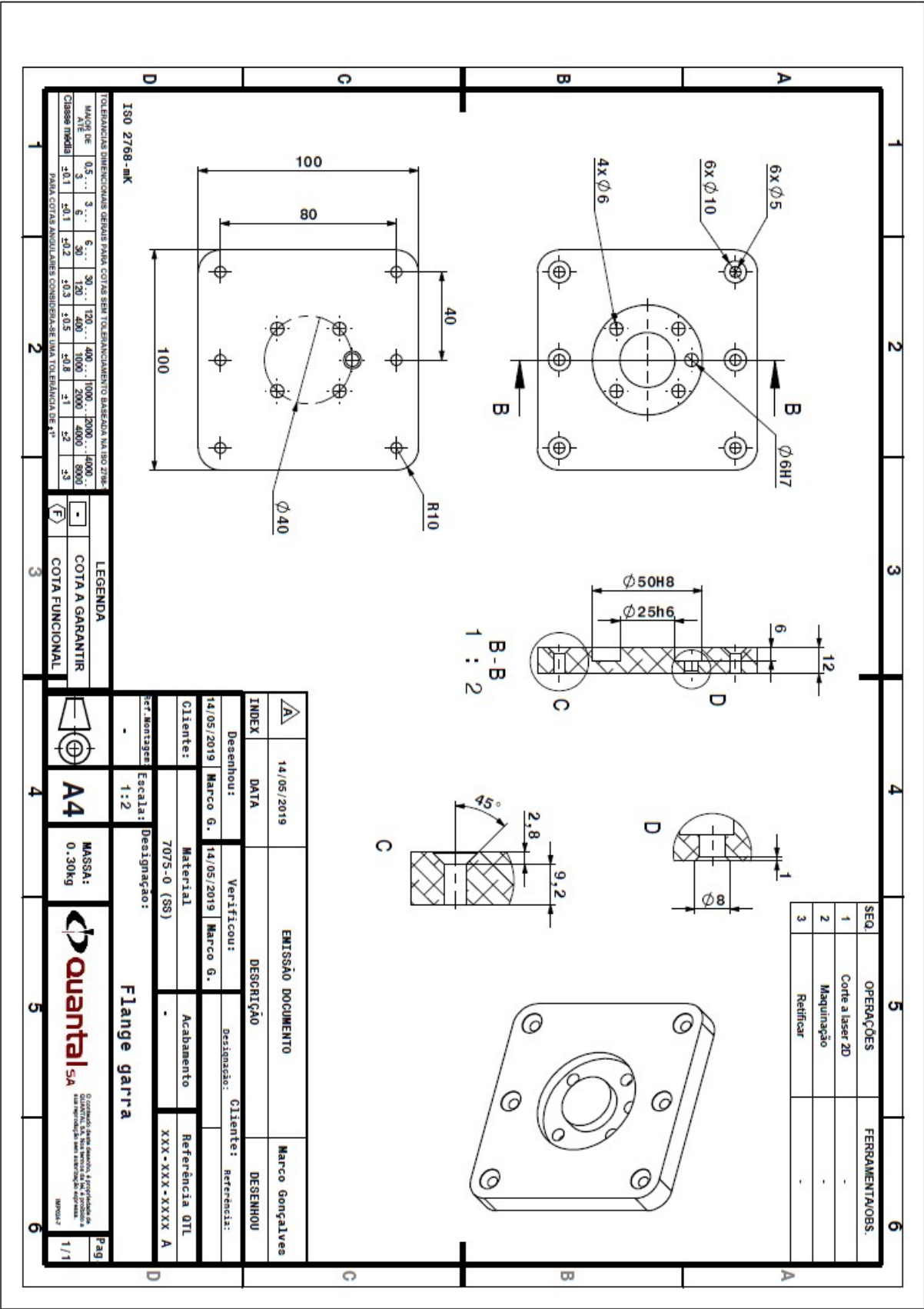
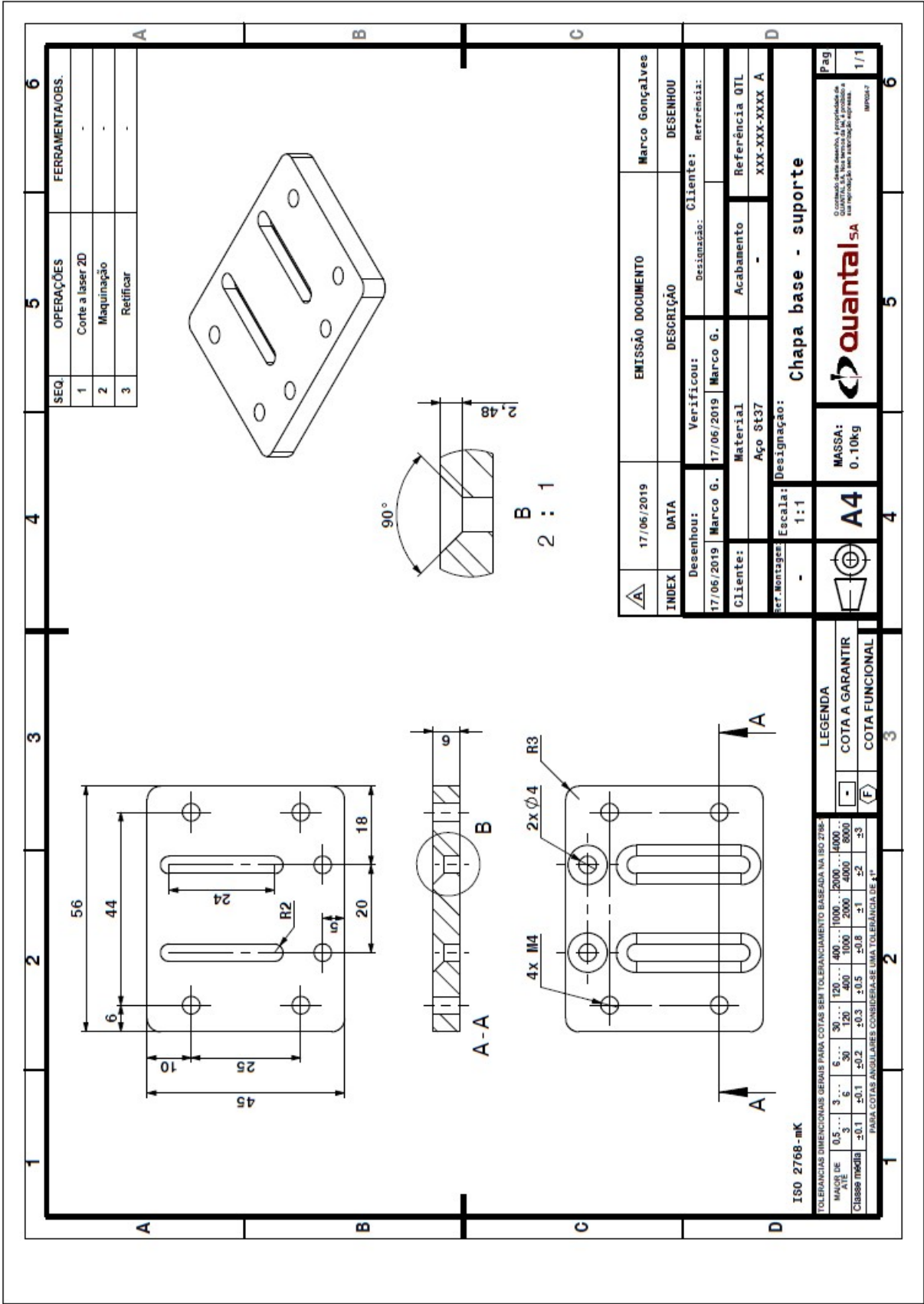


Figura A.1: Desenho de definição da flange modelada.



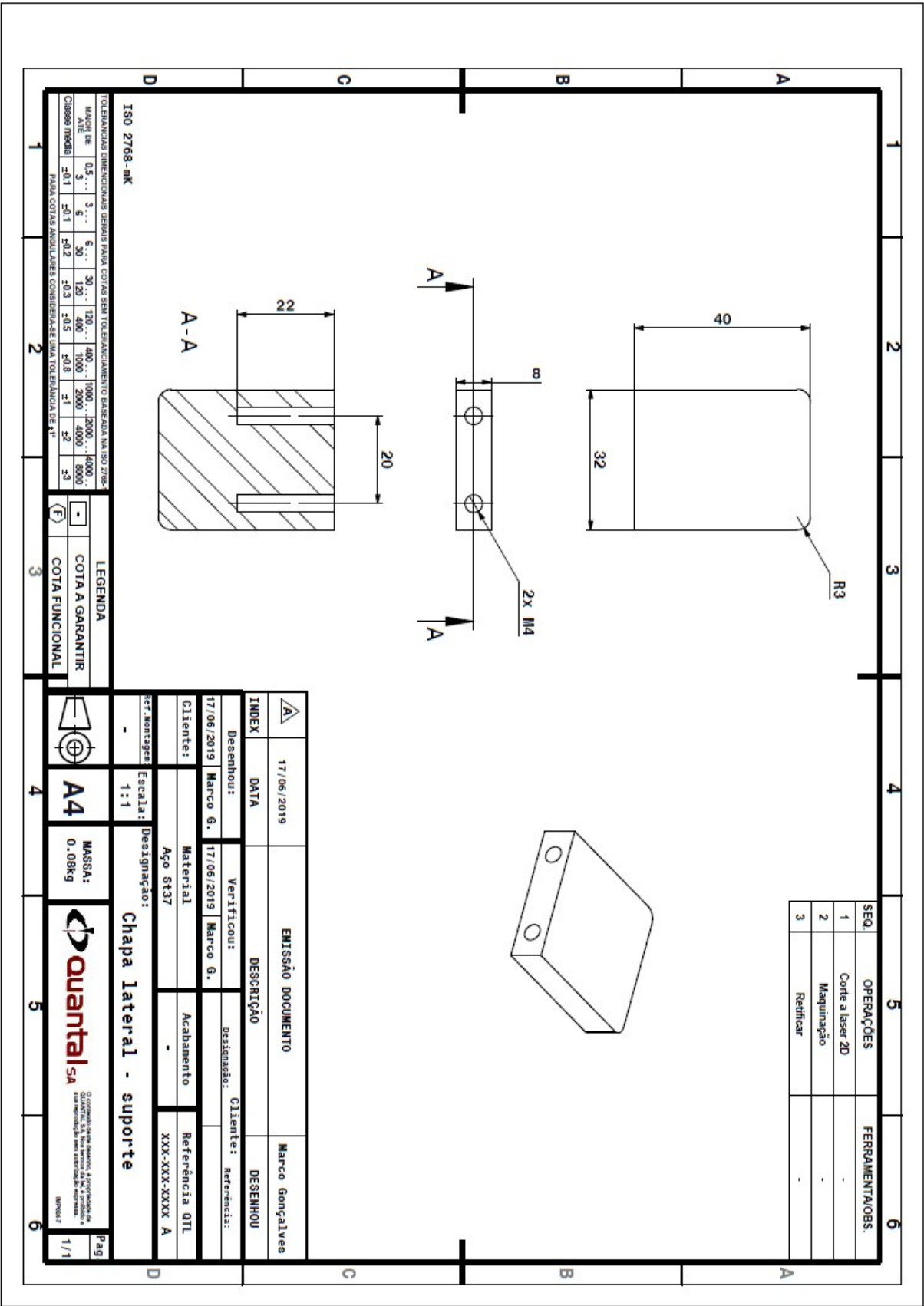


Figura A.3: Desenho de definição da chapa lateral do suporte da peça.

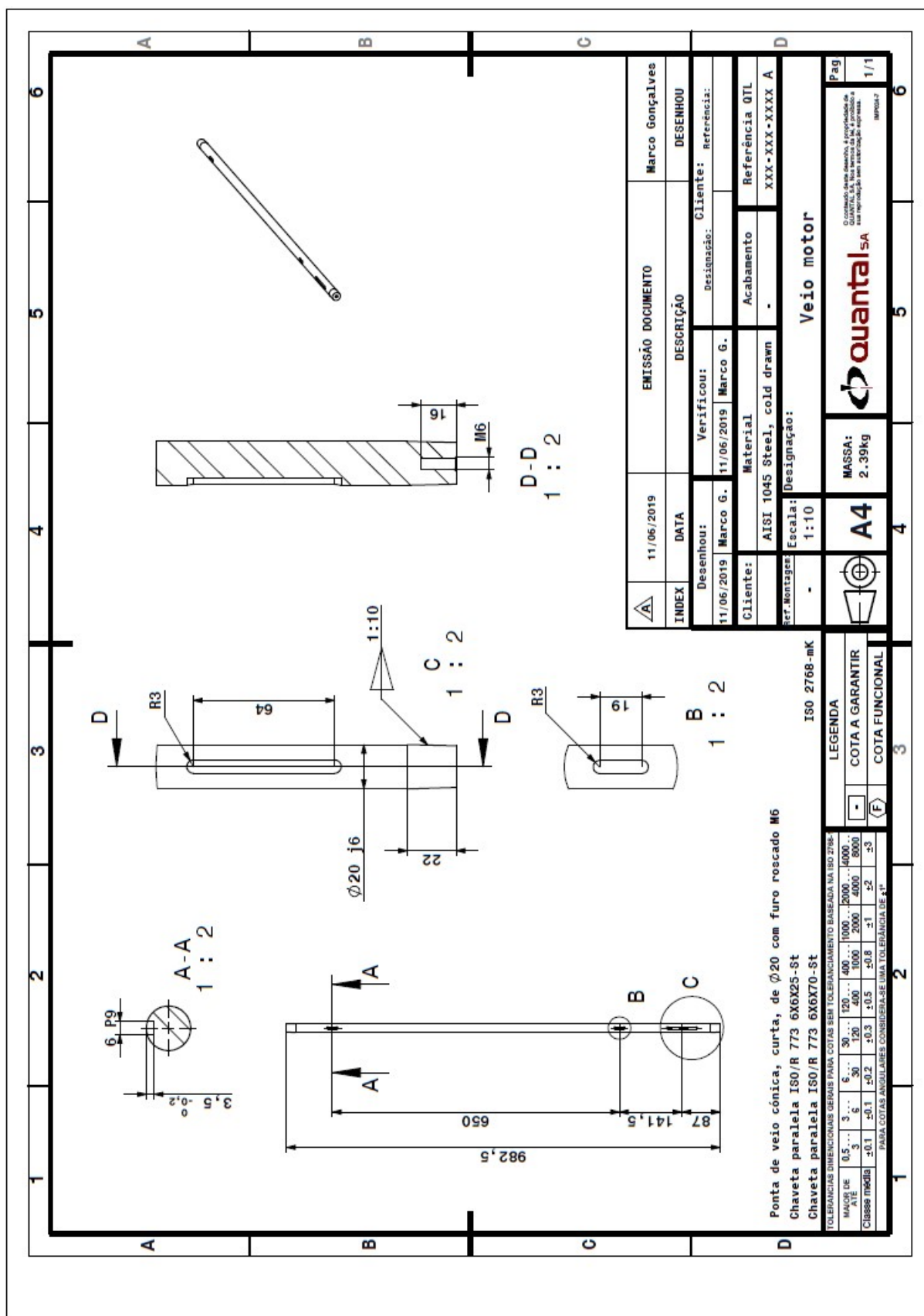


Figura A.4: Desenho de definição do veio motor.

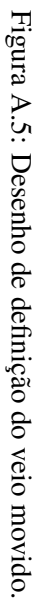


Figura A.5: Desenho de definição do veio movido.

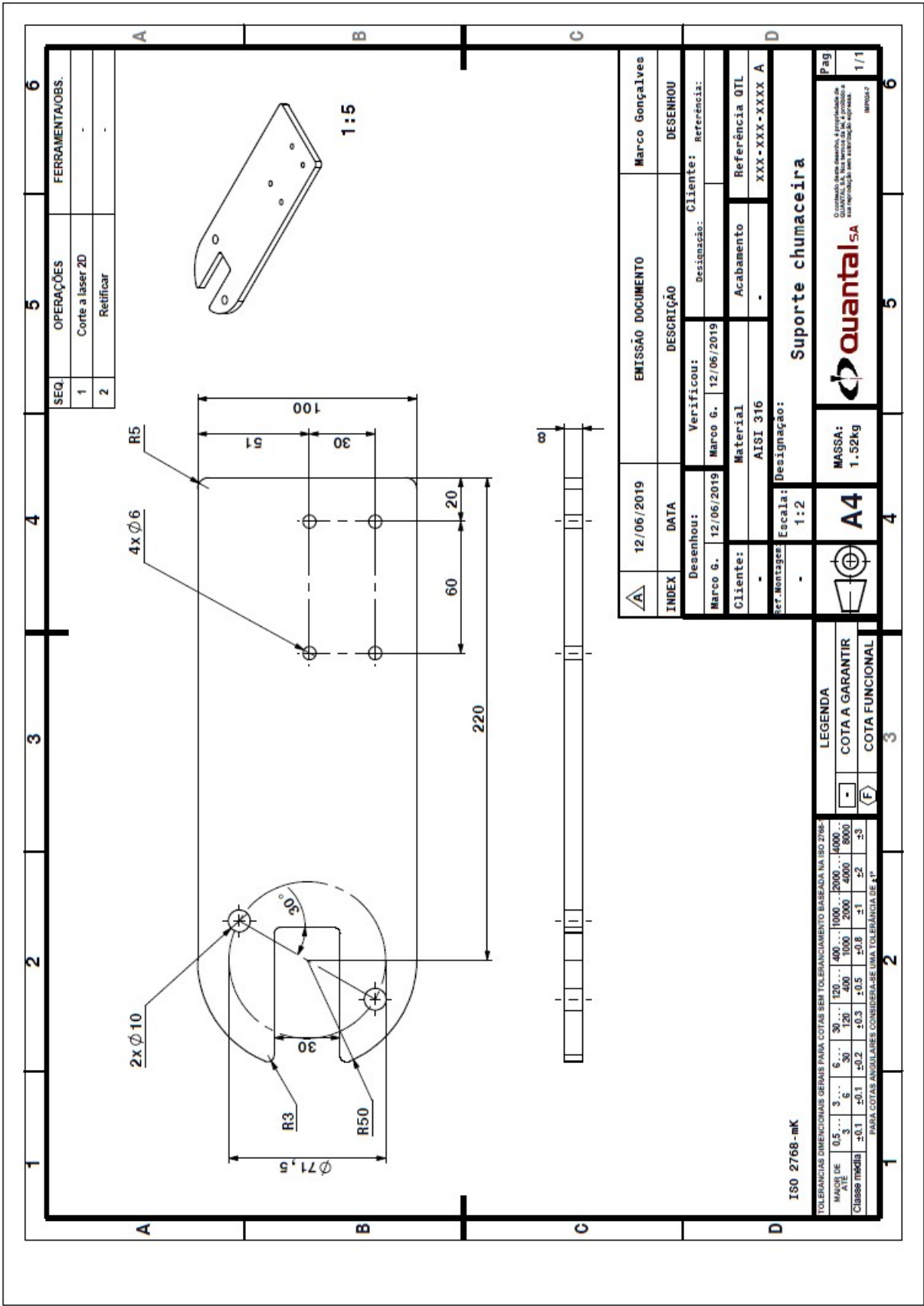


Figura A.6: Desenho de definição do suporte da chumaceira.

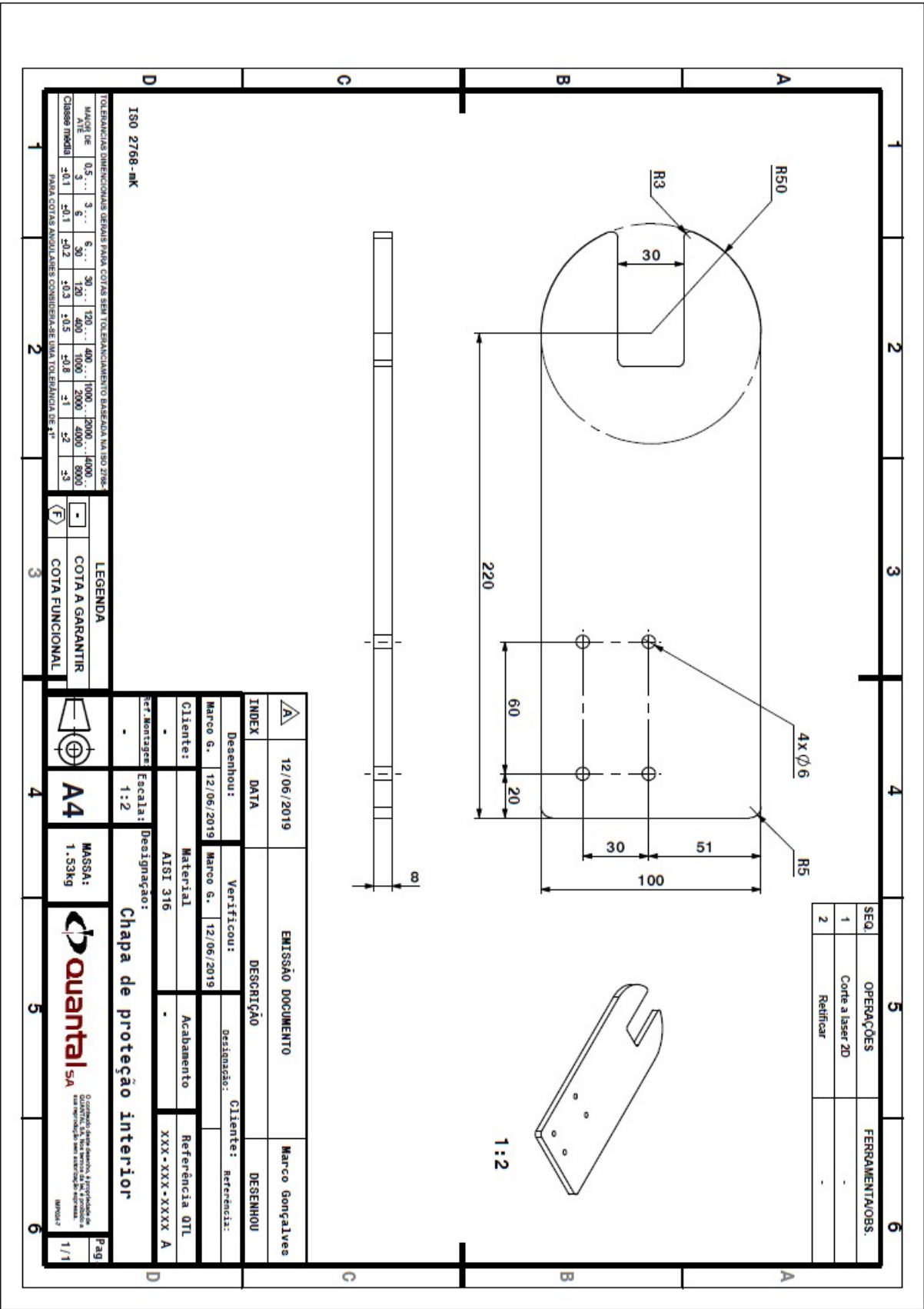


Figura A.7: Desenho de definição da chapa de proteção interior.

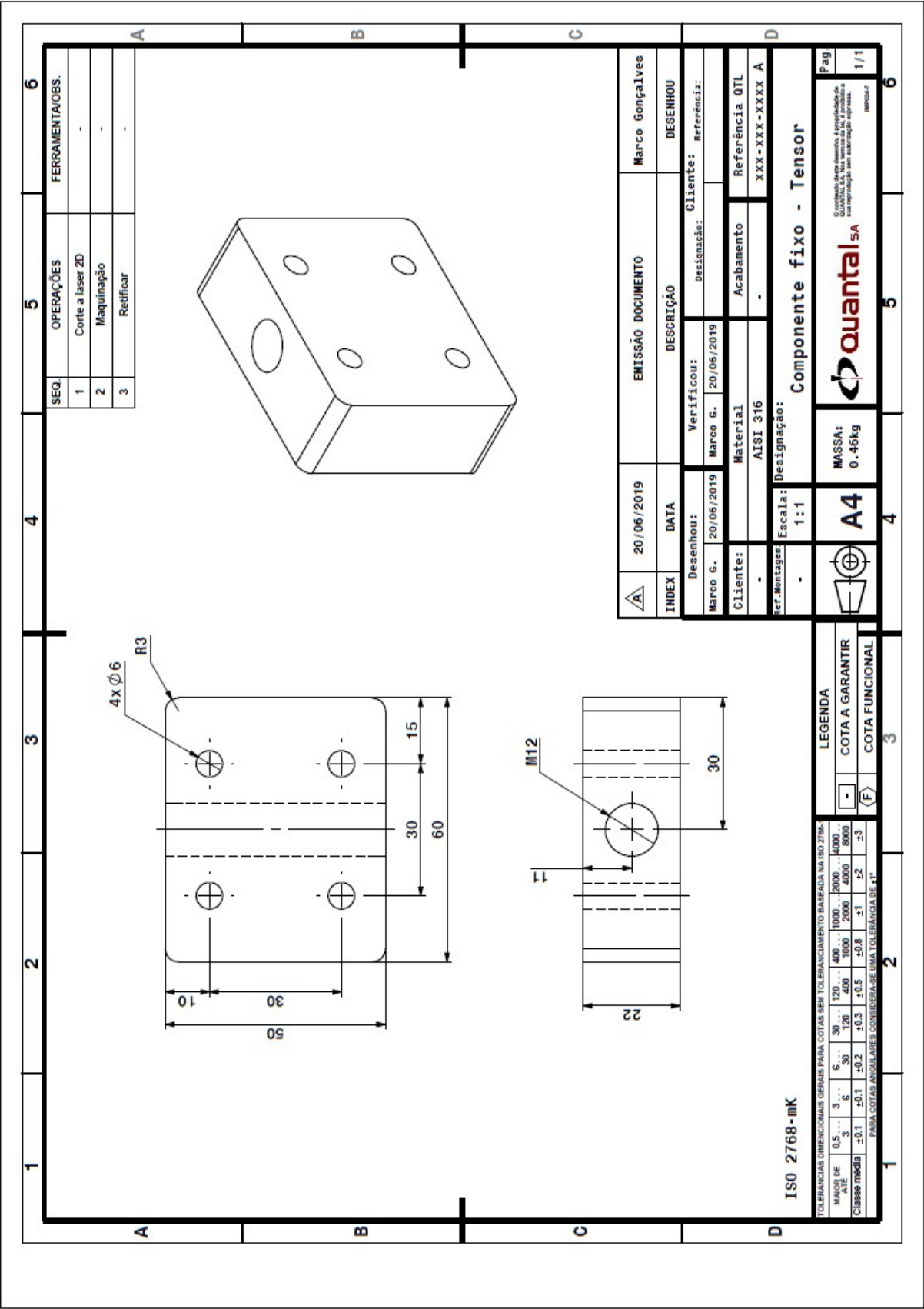


Figura A.8: Desenho de definição do componente fixo do tensor.

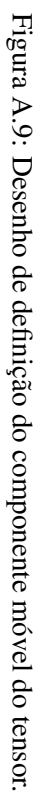


Figura A.9: Desenho de definição do componente móvel do tensor.

Referências

- Catherine Bernier. Magnetic robot end effector: Top 5 pros and cons, 2014. Disponível em <https://blog.robotiq.com/bid/65794/Magnetic-Robot-End-Effector-Top-5-Pros-and-Cons>, acessado em 12 de março de 2019.
- Lionel Birglen e Thomas Schlicht. A statistical review of industrial robotic grippers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49:88–97, 2018. ISSN 07365845. doi: 10.1016/j.rcim.2017.05.007.
- Gunnar Bolmsjö. *Industriell robotteknik*. Lund: Studentlitteratur, 2006. ISBN 91-44-28512-4.
- John King Chains. Conveyor chain design and selection, 2018. Disponível em <http://www.johnkingchains.com/technical-data/conveyor-chain-design-and-selection/>, acessado em 10 de maio de 2019.
- Carl Cloos. Robot torch and bracket, 2018. Disponível em <https://www.cloos.de/de-en/products/qineo/tungsten-inert-gas-welding-tig/tig-robot-welding-torches/roboterbrenner-und-halter/>, acessado em 28 de março de 2019.
- Esmeralda M.L. Dias. *Robótica*. Fundação para a Divulgação das Tecnologias de Informação, Primeira edição, 1993.
- European Aluminium. Aluminium automotive manual, 2015. Disponível em https://www.european-aluminium.eu/media/1518/3-arc-welding_2015_new.pdf, acessado em 28 de março de 2019.
- FANUC. Manual de mantenimiento; documentacion de proyecto, 2002.
- Festo. Holding and break-away forces on suction cups, 2019. Disponível em https://www.festo.com/wiki/en/Holding_and_break-away_forces_on_suction_cups, acessado em 19 de abril de 2019.
- Festo. Basic principles of vacuum technology. 2011.
- Festo. Vacuum suction grippers esg. 2015.
- C. M. Figueiredo. Manipuladores robóticos cooperativos. tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico de Coimbra, 2011.
- Mikell P. Groover, Mitchell Weiss, Roger N. Nagel e Nicholas G. Odrey. *Industrial Robotics - Technology, Programming, and Applications*. McGraw-Hill, Inc., 1986. ISBN 0-07-100442-4.

- Direct Industry. Tough gun ta3 robotic air-cooled mig gun, 2019. Disponível em <http://www.directindustry.es/prod/tregaskiss/product-112015-1633177.html>, acessado em 28 de março de 2019.
- Maschinen Kistner. Trumpf trumatic l3050. 2015a.
- Maschinen Kistner. Trumpf trulaser 5030 classic. 2015b.
- Maschinen Kistner. Trumpf lasercell tlc 1005. 2015c.
- Cândida Malça. Órgãos de máquinas/dimensionamento de veios. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2019.
- Patrick McGuire. *Conveyors: Application, Selection, and Integration*. Taylor and Francis Group, 2010. ISBN 978-1-4398-0388-2.
- mk Technology Group mk T. G. Conveyor technology, 2019. Disponível em https://www.mk-group.com/fileadmin/media/catalog/en/mk_Conveyor_Technology_4.0_en.pdf, acessado em 20 de abril de 2019.
- NORD. Nordbloc 1 - 2 stage helical-bevel gear unit, 2019. Disponível em https://www.nord.com/cms/media/documents/bw/G1014_IE1_IE2_IE3_EN_2217.pdf, acessado em 5 de junho de 2019.
- NPTel. Design of shaft using a.s.m.e. code, 2012. Disponível em <https://nptel.ac.in/courses/116102012/design%20of%20transmission%20shafts%20and%20drafting%20rollers/design%20of%20shaft%20using%20asme%20codet.html>, acessado em 6 de junho de 2019.
- NTN. Bearing units, 2011. Disponível em https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-03/ntn_bearing_units_en.pdf, acessado em 5 de maio de 2019.
- J. Norberto Pires, A. Loureiro, T. Godinho, P. Ferreira, B. Fernando e J. Morgado. Welding robots. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 10(2):45–55, 2003. ISSN 1070-9932.
- Prima Power. The laser - 3d line. 2017.
- Quantal. História, 2019. Disponível em <https://www.quantal.pt/historia/>, acessado em 3 de março de 2019.
- G. R. Reddy e V. K. Eranki. Design and structural analysis of a robotic arm. tese de mestrado, Blekinge Institute of Technology, 2016.
- Renold. Conveyor chain designer guide, 2019. Disponível em https://www.renold.com/upload/renoldswitzerland/conveyor_chain_-_designer_guide.pdf, acessado em 21 de maio de 2019.
- RobotWorx. Fanuc arc mate 120il, 2019a. Disponível em <https://www.robots.com/robots/fanuc-arc-mate-120il>, acessado em 22 de março de 2019.
- RobotWorx. Fanuc arc mate 120ib/10l, 2019b. Disponível em <https://www.robots.com/robots/fanuc-arc-mate-120ib-10l>, acessado em 22 de março de 2019.
- Rolisa. Catálogo técnico - transmissões, 2007. Disponível em https://www.rolisa.pt/ficheiros/catalogo_rolisa.pdf, acessado em 20 de maio de 2019.

Vitor M. F. Santos. Robótica industrial, 2004. Universidade de Aveiro.

Schmalz. Vacuum ejectors, 2019a. Disponível em <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/vacuum-generators/vacuum-ejectors/>, acessado em 19 de março de 2019.

Schmalz. Approach to system design, 2019b. Disponível em <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/system-design-calculation-example/>, acessado em 19 de março de 2019.

Schmalz. Design of the suction cup, 2019c. Disponível em <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/vacuum-suction-cups/design-of-the-suction-cup/>, acessado em 19 de abril de 2019.

Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani e Giuseppe Oriolo. *Robotics - Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag London Limited, 2009. ISBN 978-1-84628-641-4.

M. Singh e J. Joshi. *Mechatronics*. Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, Primeira edição, 2006. ISBN 978-8120329867.

William Townsend. The BarrettHand grasper – programmably flexible part handling and assembly. *Industrial Robot: An International Journal*, 27(3):181–188, 2000. ISSN 0143-991X. doi: 10.1108/01439910010371597.

Trumpf. Trulaser 5030 fiber / 5040 fiber / 5060 fiber - technical data. 2019a.

Trumpf. Product overview: The complete product line, 2019b. Disponível em <http://industrial-expert.com/public/data/companyCatalogue1226053672.pdf>, acessado em 20 de março de 2019.

Vinamachines. Laser Next, 2014. Disponível em <http://machinetool.vn/product/laser-next>, acessado em 1 de março de 2019.

Yuting Wang e Panagiotis Artemiadis. Closed-form inverse kinematic solution for anthropomorphic motion in redundant robot arms. *Advances in Robotics & Automation*, 2, 2013. ISSN 2168-9695. doi: 10.4172/2168-9695.1000110.

A. Wolf, R. Steinmann e H. Schunk. *Grippers in motion: The fascination of automated handling tasks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. ISBN 3-540-25657-1. doi: 10.1007/3-540-27718-8.

ZMC. General catalogue, 2019. Disponível em <http://www.zmc.it/wp-content/uploads/ZMC-Cat-English.pdf>, acessado em 20 de maio de 2019.