



# PROJETO DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA DE SOLDADURA

**ANDRÉ FILIPE COSTA CASTRO**

novembro de 2018

# PROJETO DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA DE SOLDADURA

André Filipe Costa Castro



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2018**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: André Filipe Costa Castro, Nº 1100691, 1100691@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2018**



Dedicado à família, à namorada, aos amigos e aos orientadores.



## *Agradecimentos*

Esta dissertação de mestrado é dedicada a todas as pessoas que a acompanharam de perto e que contribuíram de alguma forma para a sua concretização.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Manuel Silva e ao Professor Doutor Francisco Gomes da Silva por estarem presentes em todos os momentos e por todos os conselhos que me deram.



## *Resumo*

A implementação de sistemas automáticos destinados à execução de tarefas na indústria automóvel tem diversas vantagens em relação aos processos manuais. Apesar do aumento da produtividade ser uma melhoria considerável, não é a principal razão para substituir o ser humano por sistemas automáticos. A qualidade e a fiabilidade do processo surgem como duas vantagens importantes no uso de sistemas automáticos. Desde que a segurança se tornou a prioridade número um dos padrões europeus, estes dois fatores têm uma importância enorme na indústria automóvel.

Além dos veículos mais comuns produzidos em massa pelos grandes grupos da indústria automóvel, veículos especiais (tais como autocarros, ambulâncias e camiões de recolha de resíduos) circulam diariamente nas estradas de todo o mundo. Estes são produzidos por empresas mais pequenas e especializadas em um ou mais tipos de veículos.

A produção de pequenas séries, com elevado grau de personalização por cada cliente faz com que seja impossível usar linhas de produção completamente automatizadas. No entanto, os requisitos legais para produzir estes veículos especificam tolerâncias dimensionais e padrões de qualidade que começam a ser difíceis de atingir com trabalhadores humanos. As empresas estão a encontrar a solução para este problema no uso de células de fabrico flexíveis capazes de executar as tarefas mais importantes. Além das vantagens mencionadas anteriormente, estas células de fabrico permitem adaptar a sua produção às necessidades momentâneas da empresa.

Este estudo teve como objetivos determinar as vantagens associadas ao uso de uma célula robotizada de soldadura para produzir estruturas de carroçarias para autocarros e acompanhar o processo de desenvolvimento e implementação da solução no processo produtivo. De forma a realizar uma comparação fidedigna, foi escolhida uma subestrutura do compartimento de bagagem de um autocarro para efetuar todos os testes necessários.

Além disso, a utilização de um robô fora de serviço também foi estudada uma vez que o equipamento, que já estava na posse da empresa, apresentava todas as características

necessária para executar as tarefas propostas, permitindo valorizar o desempenho global do projeto e prolongar o tempo de vida útil de ferramentas importantes com custos elevados.

O método inclui o desenvolvimento de uma simulação com recurso a *software*, um teste com recurso à célula robotizada de soldadura e dez testes com recurso a um soldador. O tempo de ciclo medido no uso da célula é considerado constante e o tempo de ciclo associado ao soldador é calculado através da média dos dez testes. O tempo de preparação não foi considerado para este estudo devido à possibilidade de serem usados os mesmos meios auxiliares de produção para ambos os testes. As peças utilizadas nos testes foram analisadas através de ensaios não-destrutivos e destrutivos para recolher informação sobre a qualidade da junta de soldadura: porosidade, penetração e acabamento.

No final deste estudo, constatou-se a existência de uma redução significativa do tempo necessário para produzir uma peça e uma melhoria significativa da qualidade do produto. O tempo de ciclo mais reduzido apresenta um benefício económico: o baixo custo de produção e as maiores margens de lucro permitem que a empresa evolua para novos mercados e novos clientes. Espera-se que a redução seja significativa, permitindo uma rápida amortização do investimento. O aumento da qualidade é justificado pelo uso de processos de fabrico altamente precisos, que se tornam possíveis devido ao uso de controlos robotizados. Esta vantagem contribui para o aumento da competitividade da empresa e torna possível cumprir com os standards europeus cada vez mais exigentes.

### ***Palavras-Chave***

Robótica; Soldadura; Automação; Autocarro; Segurança; Qualidade; Projeto; Simulação

## *Abstract*

The implementation of automatic systems to execute tasks on the automotive industry brings many advantages when compared to humans. Although the increased productivity is a significant improvement, it is not the main reason to replace humans for automatic systems. The quality and reliability emerge as important advantages in the use of automatic systems. Since safety became the number one priority of European standards, the quality factor has an enormous importance in the automotive industry.

Besides the most common vehicles which are mass produced by the largest automotive groups, special vehicles, such as buses, ambulances and garbage trucks among others, circulate daily on the roads around the world. These types of vehicles are produced by smaller companies that are specialized in a certain genre of vehicles.

The small quantities of the production series and the high rate of customization per client make it impossible to use fully automated production lines. However, the legal requirements to produce these vehicles specify dimensional accuracies and quality grades that are becoming harder to achieve with human workers. These companies are finding the solution for this problem by using flexible manufacturing cells that are able to execute the most critical tasks. These cells, in addition to the advantages mentioned above, offer the ability to quickly adapt their production to the company momentary needs.

This study aimed to determine the advantages of using a robotic welding cell to produce bus body structures and to follow its implementation in the production process. In order to make a reliable data comparison, it is chosen a part from the bus's luggage to execute all necessary tests. Furthermore, the use of a robot out of service was also studied because the robot already owned presents the characteristics needed for this kind of service, allowing an enhancement of the project performance and ensuring the reusability and life-extend of some important and expansive tools.

The method includes the development of a software simulation, one test using the robotic cell and ten tests using a human worker. The cycle time measured by the robotic cell is

considered as a constant and the cycle time for a human worker is given by the average of the ten measures. The setup time is not considered for this study due to the possibility of using the same jigs for both tests. The test pieces are evaluated recurring to non-destructive and destructive tests to gather information about the quality of the welded joint: porosity, penetration and finishing.

At the end of this study, a significant reduction on the time needed to produce one component was achieved, as well as significant improvement on the product's quality. The reduced cycle time brings an economical benefit: lower cost of manufacturing and higher profits allows the company to evolve into new markets and clients. The reduction is expected to be significant, allowing for a quick payback of the investment. The quality improvement is achieved by the highly precise manufacturing process, which is possible due to the robotic control. This key advantage enhances the company's competitiveness and makes possible to fulfil the increasingly demanding European standards.

### ***Keywords***

Robotic; Welding; Automation; Bus, Safety; Quality; Design; Simulation

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE EQUAÇÕES</b> .....	<b>XV</b>
<b>SIGLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1.ENQUADRAMENTO.....	19
1.2.OBJETIVOS .....	20
1.3.METODOLOGIA .....	21
1.4.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>23</b>
2.1.ESTRUTURAS DE AUTOCARROS.....	23
2.2.SOLDADURA .....	27
2.3.SISTEMAS PRODUTIVOS E AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL .....	29
2.4.PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS .....	31
2.5.SISTEMAS DE ACIONAMENTO MECÂNICO .....	33
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	<b>37</b>
3.1.CARACTERIZAÇÃO DA CAETANOBUS .....	37
3.2.CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	38
3.3.REQUISITOS TÉCNICOS E LIMITAÇÕES .....	39
<b>4. DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>43</b>
4.1.TEMPESTADE DE IDEIAS .....	43
4.2.ANÁLISE SWOT DAS ALTERNATIVAS .....	47

4.3. SELEÇÃO DA ALTERNATIVA.....	49
4.4. ANTEPROJETO: SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	50
4.5. PROJETO MECÂNICO .....	52
4.6. PROJETO ELÉTRICO .....	90
4.7. PROGRAMAÇÃO.....	102
4.8. PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDADURA.....	105
4.9. ORÇAMENTAÇÃO.....	106
4.10. ESTUDO DE RENTABILIDADE.....	107
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>114</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Gama de produtos da Caetanobus	38
Figura 2 – Conceito A	45
Figura 3 – Conceito B	46
Figura 4 – Conceito C	47
Figura 5 – Representação isométrica do eixo linear externo	59
Figura 6 – Análise de tensões na estrutura do eixo linear externo	60
Figura 7 – Análise das deformações na estrutura do eixo linear externo	61
Figura 8 – Representação isométrica do conjunto de elevação da mesa de trabalho	62
Figura 9 – Detalhe do mecanismo de elevação da mesa de trabalho	62
Figura 10 – Gama de produtos Bosch	65
Figura 11 – Representação isométrica do mecanismo de rotação da mesa de trabalho	68
Figura 12 - Detalhe do mecanismo de rotação da mesa de trabalho	69
Figura 13 – Análise das tensões na estrutura do veio da primeira iteração	71
Figura 14 – Análise das tensões na estrutura do veio da segunda iteração	72
Figura 15 – Análise das deformações na estrutura do veio da segunda iteração	72
Figura 16 – Perfil de velocidade do servomotor do eixo rotativo externo	73
Figura 17 – Especificação técnica do servo motor Fanuc $\beta 12/3000$	77
Figura 18 – Curva característica do servomotor do eixo rotativo externo	78

Figura 19 – Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da primeira iteração	81
Figura 20 – Detalhe da concentração de tensões	82
Figura 21 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da segunda iteração	82
Figura 22 – Detalhe da concentração de tensões	83
Figura 23 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da terceira iteração	84
Figura 24 - Análise das deformações na estrutura da mesa de trabalho da terceira iteração	85
Figura 25 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da quarta iteração	86
Figura 26 – Representação da secção de um perfil estrutural IPE	86
Figura 27 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da quinta iteração	88
Figura 28 - Análise das deformações na estrutura da mesa de trabalho da quinta iteração	89
Figura 29 – Representação da célula robotizada de soldadura	91
Figura 30 – Representação da botoneira de emergência	93
Figura 31 – Representação do disjuntores magneto-térmicos	94
Figura 32 – Representação do circuito de emergência do controlador Fanuc	95
Figura 33 – Representação do circuito <i>Fence</i> do controlador Fanuc	96
Figura 34 – Representação do circuito do pedal do operador	97
Figura 35 – Representação do circuito dos sensores de fim de curso do eixo linear externo	98
Figura 36 – Representação do circuito de potência dos motores de elevação da mesa de trabalho	99

Figura 37 – Representação do circuito de comando dos motores de elevação da mesa de trabalho	101
Figura 38 – Representação do circuito dos sensores de fim de curso do mecanismo de elevação da mesa de trabalho	102
Figura 39 – Representação das peças em análise e respectivos meios auxiliares de fabrico	103
Figura 40 – Detalhe de uma das peças em análise e respetivo meio auxiliar de fabrico	104



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Análise SWOT do conceito A	48
Tabela 2 – Análise SWOT do conceito B	48
Tabela 3 – Análise SWOT do conceito C	49
Tabela 4 – Especificação técnica do pinhão do eixo linear externo	55
Tabela 5 – Especificação do sistema mecânico do eixo linear externo	55
Tabela 6 – Características gerais da mesa de trabalho	90
Tabela 7 – Parâmetros de soldadura	106
Tabela 8 – Resumo do orçamento para o fabrico da célula robotizada de soldadura	107



## *Índice de Equações*

Equação 1 – Cálculo da velocidade angular do servomotor	56
Equação 2 – Cálculo da potência mínima requerida	56
Equação 3 – Cálculo do binário em regime permanente	56
Equação 4 – Cálculo do binário de aceleração	57
Equação 5 – Cálculo do momento de inércia do pinhão	57
Equação 6 – Cálculo do momento de inércia total do sistema mecânico	57
Equação 7 – Cálculo da aceleração angular	57
Equação 8 – Cálculo do binário total teórico requerido pelo sistema mecânico	58
Equação 9 – Cálculo do binário total real requerido pelo sistema mecânico	58
Equação 10 – Cálculo da carga máximo admissível no fuso de elevação	64
Equação 11 – Cálculo do coeficiente de segurança real	65
Equação 12 – Cálculo da carga crítica aplicada no fuso	66
Equação 13 – Cálculo do momento de inércia do fuso	66
Equação 14 – Cálculo do binário requerido pela caixa redutora	67
Equação 15 – Cálculo da distância linear equivalente a uma rotação da mesa de trabalho	73
Equação 16 – Cálculo da velocidade linear em regime permanente	74
Equação 17 – Cálculo da aceleração em regime permanente	74
Equação 18 – Cálculo da velocidade angular em regime permanente	75

Equação 19 – Conversão da velocidade angular para rotações por minuto	75
Equação 20 – Cálculo da potência total teórica requerida pelo eixo rotativo externo	75
Equação 21 – Cálculo do binário requerido pela mesa de trabalho	75
Equação 22 – Cálculo da aceleração angular da mesa de trabalho	76
Equação 23 – Cálculo do binário real requerido pela mesa de trabalho	77
Equação 24 – Cálculo da relação de transmissão do sistema mecânico do eixo rotativo externo	79
Equação 25 – Cálculo do coeficiente de segurança da mesa de trabalho	80
Equação 26 – Cálculo da redução do tempo de fabrico	108
Equação 27 – Cálculo da redução do custo de fabrico	109
Equação 28 – Cálculo do número de unidades necessária para atingir a amortização do investimento	109

## *Siglas*

IPE – European I-Beam Profile

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration

SWOT – Strength, Weakness, Opportunities and Threats

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO

A indústria automóvel representa uma grande parte da indústria a nível global. A grande dimensão do Mercado automóvel tornou-se uma base para o desenvolvimento tecnológico e aplicação de novos materiais e novas metodologias. Atualmente, existe a necessidade de aumentar a produtividade de modo a que as exigências do mercado sejam satisfeitas. O sucesso desta melhoria depende, em parte, da capacidade humana para conceber máquinas automáticas capazes de executar tarefas específicas (Nof, 2009).

A implementação de sistemas automáticos tem diversas vantagens em relação à utilização de trabalhadores humanos. Apesar do aumento da produtividade ser uma vantagem significativa, não é a principal razão para substituir os trabalhadores por sistemas automáticos. A melhoria da segurança, das condições de trabalho e a redução de acidentes motivaram, desde cedo, a realização dessa substituição (Nof, 2009). A evolução dos métodos de fabrico foi seguida pela redução dos custos associados aos trabalhadores humanos. Uma vez que os sistemas automáticos são capazes de manipular, transportar e transformar matérias-primas, permitem que a linha de produção seja composta por uma equipa de trabalhadores mais reduzida. No entanto, a redução dos trabalhadores pode ter

uma consequência negativa caso os trabalhadores dispensados não sejam atribuídos a novas tarefas (Nof, 2009). O aumento da qualidade emerge como uma grande vantagem da aplicação de sistemas automatizados. A combinação da capacidade humana para desenvolver novas máquinas com a tecnologia da automação industrial e com as informações recolhidas durante o ciclo produtivo, permite que sejam criadas novas metodologias de trabalho mais eficientes em diversos parâmetros (Nof, 2009).

Além dos veículos mais comuns produzidos em massa pelos grandes grupos da indústria automóvel, veículos especiais, tais como autocarros, ambulâncias e camiões de recolha de resíduos, circulam diariamente nas estradas de todo mundo. Estes são produzidos por empresas mais pequenas e especializadas em um ou mais tipos de veículos.

A produção de pequenas séries, com elevado grau de personalização por cada cliente, faz com que seja impossível usar linhas de produção completamente automatizadas. No entanto, os requisitos legais para produzir estes veículos especificam tolerâncias dimensionais e padrões de qualidade que começam a ser difíceis de atingir com trabalhadores humanos. As empresas estão a encontrar a solução para este problema no uso de células de fabrico flexíveis capazes de executar as tarefas mais importantes. Além das vantagens mencionadas anteriormente, estas células de fabrico permitem adaptar a sua produção às necessidades momentâneas da empresa

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta tese de mestrado é projetar uma célula robotizada de soldadura capaz de produzir estruturas de carroçaria de autocarros produzidos pela empresa Caetanobus, S.A., do Grupo Salvador Caetano. O sucesso deste projeto depende da capacidade de melhorar alguns aspetos técnicos relacionados com os seguintes pontos:

- segurança do processo de produção;
- qualidade de execução da soldadura;
- otimização do tempo de produção;
- flexibilidade da célula para se adaptar à produção de diversos componentes;
- capacidade para expandir a célula de acordo com necessidades futuras da empresa;
- redução do desperdício tecnológico dentro da empresa.

### **1.3. METODOLOGIA**

O desenvolvimento deste projeto inclui diversos estudos, que são mencionados abaixo de forma ordenada:

- estudo do estado da arte das estruturas de autocarros, do processo de soldadura e da aplicação de sistemas robotizados;
- definição do problema principal;
- definição dos requisitos técnicos da solução ideal;
- tempestade de ideias e seleção da melhor alternativa;
- simulação *offline* do espaço de trabalho do robô;
- projeto mecânico;
- projeto elétrico;
- programação das trajetórias do robô;
- parametrização do processo de soldadura;
- estudo de tempos e métodos;
- análise de custo e investimento.

### **1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este documento está dividido em duas partes distintas. A primeira parte descreve de forma sucinta a necessidade de aplicação da automação na indústria e o estado da arte dos temas abordados durante o desenvolvimento da solução final. A segunda parte descreve o processo de desenvolvimento da célula, onde são abordados diversos temas relacionados com o estudo do problema, a conceção do produto final e validação da solução.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. ESTRUTURAS DE AUTOCARROS

Por definição, um autocarro é um veículo destinado a realizar transporte de passageiros. As normas europeias classificam os diferentes tipos de autocarros com base na lotação máxima de passageiros e na capacidade de transportar passageiros em pé. Um autocarro cuja lotação não exceda os 22 passageiros, além do condutor, é classificado como classe A, caso esteja preparado para transportar passageiros de pé, ou como classe B, caso esteja preparado apenas para transportar passageiros sentados. Se a lotação máxima exceder os 22 passageiros para além do condutor, a classificação do autocarro é feita em três classes: classe I, classe II e classe III. Um autocarro de classe I permite a movimentação frequente dos passageiros. Um autocarro de classe II é desenvolvido para realizar transporte de passageiros sentados, mas permite que os passageiros viagem de pé mediante certas condições. Se os passageiros apenas puderem viajar sentados, o autocarro é classificado como classe III (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), 2015).

Um autocarro, independentemente da sua classe, é composto por dois componentes principais: chassis e carroçaria. O chassis é o elemento responsável por alojar os órgãos mecânicos necessários ao movimento do veículo e também é responsável por suportar

todas as cargas aplicadas no conjunto carroçaria-chassis (Gürsel & GÜRSESLİ, 2010). A carroçaria é constituída por uma superestrutura, que define a forma geral do veículo, na qual são montados os diversos componentes interiores e exteriores: bancos de passageiro, vidros exteriores, painéis exteriores, bagageiras interiores, etc (Lapamong et al., 2013). Atualmente existem dois métodos para construir a superestrutura. O primeiro método foi desenvolvido no início da indústria dos autocarros e consiste na construção da superestrutura em torno do chassis. Sob a orientação de desenhos técnicos, a linha de produção começa a construir o esqueleto, posicionando um elemento de cada vez, a partir das ligações ao chassis até ao tejadilho. O segundo método consiste na construção da superestrutura fora do chassis. Esta superestrutura é denominada de “gaiola” e é dividida em seis partes: estrado, tejadilho, painel lateral esquerdo, painel lateral direito, frente e traseira. As seis partes diferentes são construídas em separado e posteriormente são montadas para formar a “gaiola”. No final, a gaiola é posicionada sobre o chassis e é ligada ao mesmo.

A enorme responsabilidade atribuída à superestrutura traduz-se num desafio de engenharia bastante complexo. Para ser capaz de conduzir todos os esforços aplicados até ao chassis do autocarro, a superestrutura tem de possuir uma resistência estrutural elevada. Esta propriedade traduz-se na segurança, manobrabilidade e conforto do autocarro. No entanto, é necessário existir um compromisso entre a resistência e o peso associado à estrutura para que o consumo de combustível não seja exagerado (Gauchia, Diaz, Boada, & Boada, 2010). Este compromisso pode ser atingido através da utilização de diferentes tipos de materiais. A aplicação de aços de alta resistência permite reduzir o número de elementos estruturais que, por sua vez, reduz o peso da superestrutura. Contudo, a evolução dos materiais compósitos permitiu a aplicação de materiais mais leves sem comprometer o desempenho global do veículo. O alumínio surge como uma outra opção para os engenheiros, mostrando-se como um intermédio entre os aços e os compósitos. Com uma facilidade de aplicação semelhante à do aço e com um peso mais perto dos materiais compósitos, a desvantagem do alumínio encontra-se na baixa resistência mecânica.

O acidente mais perigoso a que um autocarro pode ser sujeito é aquele que envolve o capotamento do veículo. Apesar de serem pouco frequentes, os acidentes com capotamento são os que causam mais danos materiais e pessoais. De acordo com a NHTSA, em 2002 os acidentes com capotamento foram responsáveis por 33% das vítimas derivadas de

acidentes que envolveram autocarros. Um estudo feito por Raseneck *et al.* provou que 8 acidentes ocorridos na Alemanha, entre 1985 e 1993, envolveram capotamento do autocarro e foram responsáveis por 90% do total das vítimas registadas nesse mesmo período. Um outro estudo feito por Botto *et al.* concluiu que 41% dos acidentes de autocarros, de uma amostra de 78 eventos, registados em França envolveram capotamento do veículo (Liang & Le, 2010).

Na procura de métodos para garantir a segurança da superestrutura dos autocarros, realizaram-se mais estudos e desenvolveram-se diversas teorias. Bish, Jack propôs o aumento da resistência em pontos chave da estrutura, tais como a zona do pilar A e a zona de ligação do painel lateral com o tejadilho, de modo a melhorar o desempenho da mesma em caso de capotamento. Outros investigadores decidiram abordar o problema de uma forma diferente e estudaram a utilização de materiais compósitos e resinas epóxi, tendo alcançado resultados igualmente positivos na questão do comportamento da estrutura em situações de acidente (Liang & Le, 2010).

Com o intuito transpor os diversos estudos feitos até então para aplicações práticas em autocarros que circulam frequentemente nas estradas, os vários países pertencentes à União Europeia e os Estados Unidos da América criaram regulamentos que definem os requisitos mínimos de segurança para as carroçarias desses mesmos veículos. O regulamento europeu UNECE R66, criado a 30 de Janeiro de 1987, é obrigatório para todos os autocarros de um piso com capacidade para transportar mais do que 22 passageiros sentados e tem como objetivo garantir a resistência estrutural de uma superestrutura, de modo a que ela consiga manter o espaço residual de segurança intacto após um evento de capotamento. O espaço residual de segurança diz respeito ao espaço que deve ser preservado para aumentar as probabilidades de sobrevivência do condutor, tripulação e passageiros (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), 2011).

Para obter a aprovação europeia, o veículo tem de ser submetido a um teste que simula um evento de capotamento lateral, tendo em conta o lado mais frágil e o bloqueio da suspensão. No início do teste o autocarro é colocado numa plataforma basculante e é elevado até uma posição de desequilíbrio iminente. Após esse momento, a plataforma continua a rodar e eventualmente o centro de massa do autocarro irá ultrapassar os pontos

de contacto das rodas com a plataforma. No início do capotamento, quando o veículo de teste se separa da plataforma, a velocidade angular do mesmo é nula. O veículo é atirado para uma vala de cimento com 800 mm de profundidade e a aprovação do veículo, de acordo com regulamento UNECE R66, é atribuída a este caso o espaço residual de segurança não seja invadido após a imobilização do mesmo (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), 2011).

Apesar do teste de capotamento ser um padrão estabelecido, existem outros testes equivalentes previstos no regulamento europeu. Ao invés de utilizar um veículo completo, também é possível utilizar uma secção representativa da estrutura no ensaio de capotamento ou utilizar uma demonstração teórica baseada em cargas quasi-estáticas. A partir de 2006 o regulamento europeu começou a prever a possibilidade de utilizar a simulação feita por computador para obter a aprovação. Deste modo, os construtores podem desenvolver e testar diversas soluções até encontrarem a mais conveniente sem necessitarem de elevados orçamentos (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), 2011).

Além do regulamento europeu UNECE R66 existem outros que são utilizados como padrão por países fora da União Europeia. O regulamento FMVSS 220, aplicado nos Estados Unidos da América, está em vigor desde 4 de janeiro de 1977 e foi aprovado pelo Departamento dos Transportes dos Estados Unidos (Federal Motor Vehicle Safety Standards, 1977).

O regulamento FMVSS 220 especifica, de forma semelhante ao regulamento UNECE R66, qual deverá ser o dano máximo admissível sofrido pela carroçaria de um autocarro durante um evento de capotamento. A principal diferença entre o regulamento americano e o regulamento europeu encontra-se no alcance da aplicação. O regulamento americano é aplicado a autocarros escolares, a autocarros urbanos e a carrinhas com menos de 10,7 metros de comprimento. Outra grande diferença entre ambos os regulamentos está no método adotado para efetuar o teste de aprovação. O regulamento FMVSS 220 especifica que o veículo deve ser mantido na sua posição natural enquanto é submetido a um esmagamento, no tejadilho, através de uma plataforma rígida, plana e retangular. Esse esmagamento deve ser feito por uma força igual a 1,5 vezes o peso do veículo em vazio e a uma velocidade máxima de 12,7 mm/s. Para receber a aprovação, a estrutura da carroçaria

não pode sofrer uma deformação superior a 130.18mm e deve ser possível operar a porta de emergência durante e após o teste (Federal Motor Vehicle Safety Standards, 1977).

Em adição ao UNECE R66 e ao FMVSS 220, existem outros regulamentos que são aplicados nos diversos países fora da Europa e da América do Norte. Por exemplo, na África do Sul os autocarros são regulamentados pelo padrão SANS 1563 e na Austrália estes são regulamentados pelo padrão ADR 59/00. Ambos os padrões são versões modificadas do regulamento UNECE R66 (Liang & Le, 2010).

## **2.2. SOLDADURA**

O processo de soldadura com recurso a gás de proteção é uma metodologia de fabrico que consiste em estabelecer um arco elétrico entre um eletrodo contínuo, denominado de material de adição, e uma base de metal. A base metálica normalmente é formada por duas peças do mesmo material, que são unidas ao longo da execução das etapas de fabrico. A união é realizada através da fusão do material de adição com o material da base metálica, que ocorre assim que o arco elétrico é estabelecido e o eletrodo transfere o seu material. Atualmente existem dois processos largamente utilizados na indústria que se baseiam na teoria anteriormente descrita, sendo eles o processo MIG e o processo MAG. A composição química do gás utilizado estabelece a diferença entre o processo MIG e o processo MAG. O primeiro faz uso de um gás inerte cuja composição pode variar entre o Hélio e o Árgon e o segundo faz uso de um gás ativo que normalmente é composto por dióxido de carbono (Rowe & Jeffus, 2008).

Disponível na indústria desde 1948, a soldadura com recurso a gás de proteção permite trabalhar vários tipos de materiais, tais como: aço, alumínio, aço inoxidável, cobre e titânio. A versatilidade do processo torna-o ideal para indústrias que recorram a várias ligas metálicas para produzir os seus produtos, como é o caso da indústria das carroçarias para autocarros. Desta forma, os fabricantes têm a possibilidade de estabelecer uma linha de produção capaz de lidar com todo tipo de estruturas sem ter a necessidade de possuir equipamentos específicos para cada tipo de material. Um equipamento de soldadura MIG ou MAG é constituído essencialmente por uma fonte de alimentação, por um alimentador automático do eletrodo, por uma tocha e por um reservatório de gás. No entanto, para processos de produção mais exigentes alguns componentes têm de ser selecionados com

base em certos critérios. Por exemplo, a tocha é um componente que tem de ser escolhido com rigor para garantir um bom desempenho do equipamento de soldadura, caso este se destine a uma linha de produção com uma carga horária diária elevada, como é o caso de linhas de produção robotizadas. Nestas situações, as tochas têm de ser refrigeradas e consequentemente os equipamentos de soldadura têm de ser também compostos por um permutador de calor e uma bomba de água. As ligações elétricas também são de cariz bastante importante, uma vez que o processo de baseia na utilização de corrente elétrica, e como tal devem ser selecionadas de acordo com a natureza do trabalho a realizar. Ou seja, para trabalhos rápidos e menos exigentes a ligação pode ser feita através de um grampo acionado por uma mola e para trabalhos mais demorados e exigentes a ligação deverá ser feita através de um grampo com parafuso (da Silva, Scotti, Jr, & de Oliveira, 2011; Rowe & Jeffus, 2008).

Os processos de soldadura MIG e MAG são caracterizados por uma série de vantagens que ao longo dos anos permitiram firmar as suas posições como processos de fabrico de eleição para as mais diversas atividades da metalomecânica. Além da capacidade para processar diferentes ligas metálicas, tal como foi descrito anteriormente, as vantagens destes processos de fabrico encontram-se no comprimento do eletrodo, que é bastante superior ao dos demais processos de soldadura, e na tarefa de limpeza da junta soldada, que é mais simples e menos morosa. Estas duas características facilitam a implementação de um processo robotizado, uma vez que a realização de vários metros de cordões de soldadura requer pouca intervenção do operador. As taxas de deposição de material superiores permitem atingir velocidades de fabrico igualmente superiores, o que influencia diretamente a viabilidade económica do processo (da Silva et al., 2011; Rowe & Jeffus, 2008).

A barreira da viabilidade económica da robotização do processo de soldadura é apontada por alguns autores em 1000 unidades anuais de uma dada peça. No entanto, esses mesmos autores também sugerem que cada fábrica é um caso único e que podem atingir a rentabilidade financeira com volumes de produção menores, dependendo da estratégia de aquisição dos equipamentos. As vantagens associadas à automatização do processo de soldadura incidem essencialmente sobre a qualidade final do produto e sobre a eficiência geral da linha de produção. Estudos indicam que a implementação de um par constituído por um trabalhador humano e um robô aumentam a produtividade do posto de trabalho

entre 2 até 4 vezes. Contudo, nem todas as fábricas reúnem as condições necessárias para atingir este avanço tecnológico, sendo que são necessárias outras etapas de implementação além do investimento financeiro. Essas etapas referem-se à preparação do produto ao novo método de fabrico, onde muitas vezes as peças têm de ser redesenhadas e adaptadas para permitir atingir tolerâncias mais apertadas (Weman, 2011).

Apesar de tudo, os processos de soldadura MIG e MAG possuem algumas limitações em comparação aos restantes processos usados na construção soldada. Devido aos componentes que constituem o equipamento de soldadura, não é viável considerar a sua portabilidade. Assim sendo, estas metodologias de fabrico destinam-se essencialmente a trabalhos realizados dentro de um espaço específico da fábrica. Esse espaço também necessita de ser cuidadosamente escolhido e desenhado para não afetar negativamente o desempenho do equipamento. Isto pode acontecer dado que a utilização de gases de proteção necessita de um espaço sem correntes de ar capazes de causar a sua dispersão. Por fim, a geometria da tocha também tem um impacto negativo na versatilidade do processo de fabrico. Ou seja, a sua dimensão e a sua forma são dois aspetos limitativos para realizar uniões em peças de pequena dimensão ou em sítio de difícil acesso.

### **2.3. SISTEMAS PRODUTIVOS E AUTOMAÇÃO FLEXÍVEL**

Os sistemas produtivos representam uma grande parte das fábricas. São compostos por trabalhadores, equipamentos e procedimentos que são organizados com o objetivo de atingir uma ou mais metas de uma empresa. Atualmente, os sistemas produtivos são largamente compostos por sistemas de automação, mas é raro encontrar um sistema completamente automatizado. A razão para isso acontecer é a necessidade de existirem trabalhadores para supervisionar o processo e que façam o sistema funcionar da maneira correta. Dependendo do *layout* fabril, os diversos trabalhadores e equipamentos poderão ser dispostos de diversas maneiras que permitam criar um fluxo de trabalho eficiente.

A quantidade produzida anualmente por uma fábrica afeta diretamente o seu layout. Podem-se classificar as diversas fábricas em três tipos diferentes, considerando a sua produção anual: baixa produção, média produção e alta produção (Cupek, Ziebinski, Huczala, & Erdogan, 2016). As fronteiras que separam cada tipo de fábrica são difusas e dependem do autor em questão. Porém, podem-se assumir que uma fábrica de baixa

produção fabrica um máximo de 100 componentes por ano, que uma fábrica de média produção fabrica entre 100 e 10000 componentes por ano e que uma fábrica de alta produção produz acima de 10000 componentes por ano (Groover, 2007). Uma vez que os fabricantes de veículos especiais produzem, na sua grande maioria, entre 100 a 10000 veículos anualmente, esta secção irá focar-se no estudo das fábricas de média produção.

As fábricas de média produção são normalmente organizadas de acordo com duas metodologias de produção distintas: produção por lotes e produção por células. Fábricas com uma grande variedade de componentes utilizam o método de produção por lotes para organizarem os seus trabalhadores e equipamentos da melhor maneira possível para produzir um ou mais lotes de um componente específico. Normalmente, o melhor resultado desta organização é uma linha de produção. A desvantagem adjacente à produção por lotes é o tempo necessário para reorganizar a fábrica e começar a produzir o próximo lote, que é diferente do anteriormente produzido. O tempo de reorganização é necessário para modificar a disposição das ferramentas, adicionar novas ferramentas e aplicar novos parâmetros de utilização das máquinas. Este período de adaptação pode ser atenuado ou reduzido através da aplicação da metodologia de produção por células. A metodologia de produção por células consiste no desenvolvimento de diferentes células de fabrico, compostas por trabalhadores e por uma ou mais máquinas, que são especializadas na produção de um grupo específico de componentes. Os componentes que constituem esse grupo devem ser cuidadosamente seleccionados de modo a garantir que não existem diferenças significativas entre eles e que possam ser fabricados com os mesmos equipamentos. A grande desvantagem associada a esta metodologia é a limitação da variedade de componentes que é permitida (Vatanabe, Lippi, de Lima, Paulino, & Silva, 2016).

A variedade de componentes, que foi mencionada anteriormente, refere-se aos diferentes componentes produzidos por uma fábrica específica. O conceito associado à diferença entre componentes diz respeito a produtos com diferenças na geometria e volume, a produtos com diferenças na lista de componentes pela qual são constituídos e a produtos específicos para um mercado em particular. Atualmente, todas estas situações que distinguem diferentes componentes são uma realidade na indústria de fabrico de autocarros. No entanto, na indústria dos autocarros a variedade de componentes atinge um novo patamar, uma vez que existem quatro tipos de autocarros diferentes: miniautocarros,

urbanos, turismo e aeroporto. Assim sendo, pode-se assumir que podem coexistir quatro sistemas produtivos diferentes, cada um com a sua variedade de componentes. O conceito de variedade de componentes pode ser classificado por dois termos: *hard* ou *soft*. A classificação depende da quantidade de diferenças que existem entre os dois componentes em estudo (Groover, 2007). Considerando dois autocarros distintos, sendo um urbano e outro de aeroporto, que não partilham qualquer componente na sua constituição, pode-se dizer que pertencem ao conceito de variedade de componentes *hard*. No entanto, se se considerarem dois autocarros de turismo, que pertencem ao mesmo sistema produtivo, pode-se dizer que pertencem ao conceito de variedade de componentes *soft*. Na indústria dos autocarros existem sempre diferenças entre dois veículos do mesmo tipo devido à exigência de personalização imposta por cada cliente. Os autocarros destinados ao ambiente urbano e os autocarros de turismo destinados a viagens de longo curso devem permitir um determinado nível de personalização. A exigência de cada cliente, mencionada anteriormente, depende das normas de cada país, das políticas internas do transportador e do mercado a que o autocarro se destina. As diferentes configurações de cada autocarro da mesma tipologia são o que permite distinguir os diferentes lotes de produção entre si, mas também são o que permite implementar uma metodologia de produção por células devido ao elevado número de componentes que são comuns.

#### **2.4. PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS**

A necessidade de programação de robôs industriais surgiu com o aparecimento e aplicação dos mesmos. Em meados da década de 60 do século XX os robôs eram programados de acordo com o modo *teach-and-repeat* e sem qualquer recurso a computadores. Apesar do método em questão ser suficiente para diversas aplicações na indústria, tais como soldadura por pontos e pintura, rapidamente se iniciaram esforços para desenvolver novos métodos de programação dos manipuladores (Gruver, Soroka, Craig, & Turner, 1984). Tendo em conta o processo de soldadura, o tempo necessário para a programação do robô, através da metodologia *teach-and-repeat*, poderá exceder os 8 meses. Desta forma, tornou-se impossível para as pequenas e médias empresas beneficiarem da aplicação de robôs industriais nas suas linhas de produção, uma vez que o tempo necessário para a implementação tornava o projeto economicamente inviável (Pan, Polden, Larkin, Van Duin, & Norrish, 2010). Um outro fator que evidenciou as limitações da programação

*online* foi a aplicação dos robôs industriais em tarefas de paletização, que também possuem trajetórias bastante complexas e de elevada precisão. Além das limitações evidenciadas, a programação *online* encontrou um outro problema com a globalização da indústria e com o aumento das taxas de produção. Atualmente, os tempos de paragem de um equipamento devido a manutenção ou troca do plano de fabrico são cruciais e por esse motivo as empresas procuram instalar equipamentos que ofereçam flexibilidade ao meio onde estão inseridos. Com base nesta ideologia de gestão industrial, a programação *online* tornou-se menos interessante, visto que os seus programas não podem ser reutilizados para implementar no fabrico de componentes semelhantes e o robô não pode ser utilizado para produção enquanto o novo programa é gerado. Também é possível afirmar que a programação *online* nem sempre gera os programas mais otimizados porque a qualidade das trajetórias depende da qualidade e do rigor do operador. Todavia, o método de programação *online* ainda é o mais utilizado nas empresas que aplicam manipuladores robóticos nos seus sistemas produtivos e, por esse motivo, têm vindo a ser desenvolvidos novos métodos de programação semelhantes a este, mas com a adição de transdutores de força, de posição e de binário, bem como sensores de visão tridimensional. Desta forma, a estruturação do programa é acelerada, uma vez que os sensores aplicados validam a inexistência de colisões e a velocidades ao longo da trajetória automaticamente, e a sua qualidade não depende somente da qualidade do operador da célula. No entanto, a adição de sensores e de interfaces gráficas no *teach pendant* do controlador e a possibilidade de programar o manipulador através do processo *drag & teach* não permitiram eliminar as dificuldades encontradas pelos operadores de células robotizadas de grande dimensão e de grande complexidade, com diversos eixos externos e com diversos robôs em simultâneo. Para programar células robotizadas dessa natureza os operadores dependem de forma exclusiva dos processos de programação e simulação *offline*.

O método de programação *offline* colmata diversas dificuldades encontradas durante o processo de programação *online*. Uma vez que a programação ocorre num ambiente gráfico computadorizado, a empresa não necessita de acesso físico ao robô durante a fase de programação. Assim sendo, o tempo de desenvolvimento de uma célula robotizada é encurtado e o tempo de paragem da célula devido à troca de um programa também diminui. Considerando ainda o processo de troca de componente em fabrico, a programação *offline* permite reduzir ainda mais o tempo de implementação através da

reutilização de programas, com peças semelhantes ou rotinas idênticas. Tal como foi referido anteriormente, o ambiente de simulação permite colmatar diversos problemas, tais como colisões, limitação de movimentos e alcance, sem ser necessário possuir o robô, o que torna este método de programação bastante mais seguro para o operador. No entanto, a implementação de *software* de programação *offline* requer um investimento maior por parte da empresa. Normalmente, os *softwares* de programação indicados para cada fabricante são vendidos separadamente do manipulador e necessitam de um programador dedicado, além do operador da célula. Por fim, a programação é feita com base num modelo tridimensional da célula e do componente a fabricar, o que obriga a adicionar um software de modelação e um desenhador qualificado ao investimento necessário. Apesar de tudo, a programação *offline* é largamente utilizada em indústrias de grande investimento, tais como a automóvel e aeronáutica, mas as suas desvantagens são a justificação para que uma empresa apenas possua robôs industriais de um dado fabricante. Apesar de terem sido feitos vários esforços no sentido de criar uma linguagem universal e tradutores entre diferentes modelos de diferentes fabricantes, ainda permanece como um problema real da atualidade. Desta forma, a programação *offline* trouxe uma nova preocupação à manutenção dos sistemas produtivos relacionada com a padronização dos modelos de robôs utilizados nas linhas de produção. Ou seja, as fábricas criaram e mantiveram a tendência de utilizar apenas robôs de um fabricante para colmatar a necessidade de vários técnicos especializados em várias marcas.

## **2.5. SISTEMAS DE ACIONAMENTO MECÂNICO**

Atualmente, existem diversas soluções para movimentar todo o tipo de cargas. A movimentação de cargas, quer seja em translação ou em rotação, pode ser efetuada através de mecanismos de fuso e fêmea, de mecanismos hidráulicos, de mecanismos pneumáticos, de atuadores lineares elétricos ou através de mecanismos de pinhão e cremalheira. Relativamente aos mecanismos de fuso e fêmea, normalmente são acionados por motores elétricos, de corrente alternada ou corrente contínua, e a transmissão de binário é efetuada através de acoplamento direto, de engrenagens, de transmissão por corrente ou através de transmissão por correia. A escolha dos mecanismos e respetivo acionamento está diretamente relacionada com as características da aplicação.

Os mecanismos mais simples de instalar e executar manutenção são os cilindros pneumáticos e os atuadores elétricos. Estes componentes não se fazem acompanhar de periféricos muito volumosos ou complexos, necessitando apenas de uma fonte de ar comprimido ou de corrente elétrica e de uma válvula pneumática ou de um interruptor. A principal desvantagem destes acionamentos reside nas cargas máximas admissíveis, no preço de aquisição e no curso de movimentação. Um atuador elétrico ou um cilindro pneumático capaz de movimentar uma carga elevada ao longo de uma distância elevada tem uma dimensão considerável e normalmente está excluído dos produtos normalizados dos fabricantes. Isto traduz-se num preço de aquisição bastante elevado e num problema de instalação bastante complexo, necessitando de uma estrutura mais robusta, mais pesada e com maiores dimensões em relação à estrutura necessária para albergar, por exemplo, um mecanismo de fuso e fêmea. A questão da segurança também é um ponto negativo para estas soluções. Um cilindro pneumático quando sofre uma perda de pressão relacionada com um fator externo ao componente, como por exemplo uma fuga na rede de ar comprimido, é incapaz de manter a sua posição. A mesma situação pode acontecer no atuador elétrico durante uma falha de corrente elétrica, caso não esteja equipado com medidas de segurança adequadas.

Os cilindros hidráulicos são uma alternativa aos cilindros pneumáticos em situações em que as cargas a movimentar são elevadas. Contudo, apresentam as mesmas desvantagens relativamente à dimensão para deslocamentos elevados. Além disso, são mais pesados e necessitam de periféricos dispendiosos, tais como geradores hidráulicos e multiplicadores de pressão e válvulas de controlo para altas pressões. Relativamente à manutenção, os cilindros hidráulicos ficam em desvantagem, uma vez que necessitam de inspeções regulares e trocas periódicas de fluídos e filtros. A pressão existente no interior do circuito hidráulico e os danos causados por uma fuga de fluído hidráulico também se revelam um problema adicional de segurança. Apesar destes componentes estarem certificados e testados, mecanismos que não estejam sujeitos a altas pressões são sempre preferidos para minimizar os danos em caso de acidente.

Uma alternativa aos cilindros pneumáticos e aos cilindros hidráulicos é o mecanismo de translação baseado no princípio de fuso e fêmea. Devido ao seu princípio de funcionamento, este mecanismo é o mais apropriado, juntamente com o mecanismo de pinhão e cremalheira, para médias distâncias, uma vez que não ocupa tanto espaço como

um cilindro de grandes dimensões e não exige uma estrutura de apoio extremamente robusta. A precisão é um ponto muito forte deste mecanismo de acionamento. Na maioria das situações são utilizados fusos de rosca trapezoidal ou fusos de esferas em combinação com fêmeas de folga reduzida. Este conjunto permite movimentar cargas com elevada precisão com o mínimo de complexidade. O mesmo não acontece nos atuadores pneumáticos e nos atuadores hidráulicos, onde a implementação de um controlador de posição requer mais periféricos e eleva a complexidade da solução. Na questão do controlo de posição, a maioria dos atuadores elétricos do mercado também saem em desvantagem, dado que necessitam de algoritmos de controlo mais complexos e não são conhecidas as suas características internas necessárias à implementação desses mesmos algoritmos. Ao contrário do que acontece em grande parte das restantes soluções, o mecanismo de fuso e fêmea não necessita de periféricos além do meio de acionamento e transmissão de binário. Na maioria das situações, o meio de acionamento é um motor elétrico e o binário é transmitido por meio de um acoplamento direto ao fuso, de um par engrenagens, de uma corrente metálica ou de uma correia trapezoidal, podendo esta ser dentada ou não. O acoplamento direto é preferível em relação a qualquer outro método de transmissão de binário, dado que não necessita de um segundo veio e respetivos apoios, de um tensionador e de uma correia ou uma corrente. Adicionalmente, a solução de acoplamento direto tem uma vantagem na área da segurança relacionada com a rutura de material, sendo que a correia ou a corrente estão mais suscetíveis a falhar numa situação de esforço, quando comparadas com o acoplamento e poderão causar danos mais extensos. Como em grande parte das situações é impossível, ou bastante difícil, implementar uma solução de acoplamento direto no veio, torna-se relevante comparar as demais soluções de transmissão de binário.

A utilização de um par de engrenagens para transmitir o binário para o fuso também é uma situação que ocorre com grande frequência apesar das suas limitações. Apesar de ser uma solução caracterizada pela fiabilidade e baixa manutenção, a instalação de um par de engrenagens revela-se muito mais complexa por necessitar de um segundo veio e por exigir o cumprimento rigoroso das cotas de afastamento entre os dois veios. Os cálculos necessários para determinar o valor correto do afastamento e a necessidade de instalar mais apoios na estrutura para o segundo veio tornam esta solução menos desejada para aplicações simples e de baixo custo. Por forma a minimizar o impacto da tolerância

dimensional necessária para instalar um par de engrenagens em dois veios, em diversas situações opta-se por instalar um sistema de transmissão de binário por corrente metálica ou correia. Atualmente, dada a vasta gama de correntes e correias existentes no mercado, é possível instalar qualquer uma das duas soluções em grande parte das aplicações, independentemente da carga a movimentar. Todavia, existem pormenores relativos à montagem de cada solução que tornam o sistema de corrente preferível. Enquanto uma solução com correia trapezoidal ou dentada necessita sempre de um sistema para esticar a correia após a montagem, uma solução com corrente metálica pode dispensar esse sistema, uma vez que é montada em elos. Contudo, as soluções que fazem uso de uma correia possuem vantagens em questões associadas à manutenção, visto que não necessitam de lubrificações periódicas tais como as soluções baseadas em correntes metálicas.

Por fim, o mecanismo de pinhão e cremalheira é um mecanismo que apenas pode ser utilizado para sistemas de translação. Indicado para soluções de grandes distâncias, tem um custo de implementação relativamente baixo e não necessita de processos muito complexos para realizar a sua montagem. Tal como os mecanismos de fuso e fêmea, também necessita de manutenções regulares para garantir a lubrificação do sistema e a limpeza de detritos. Uma vez que a cremalheira é descrita como uma engrenagem de raio infinito, a desvantagem indicada para a transmissão de binário por meio de um par de engrenagens também se aplica nesta situação. A necessidade de garantir uma cota de afastamento entre o pinhão e a cremalheira pode tornar o desenvolvimento do sistema mecânico complexo e menos desejável face à aplicação de outros mecanismos.

# 3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

## 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA CAETANOBUS

As origens da Caetanobus, S.A remontam ao ano de 1946, quando foi fundada a empresa “Martins, Caetano & Irmão”. Esta sociedade, composta por Joaquim Domingos Martins, Salvador Caetano e Alfredo Caetano, acabou por se desfazer passado pouco tempo, tendo ficado apenas Salvador Caetano na sua liderança.

A inovação e o sucesso têm lugar na história da empresa desde bastante cedo, tendo em 1955 introduzido carroçarias de autocarros compostas na sua grande maioria por elementos em aço. Já na década de 60, a empresa muda de nome para “Salvador Caetano Indústrias Metalúrgicas e Veículos de Transportes” e inaugura uma nova unidade fabril em Vila Nova de Gaia. Ainda neste período, a empresa inicia o processo de internacionalização com a exportação de autocarros para o Reino Unido e com a assinatura de um contrato de importação e distribuição da marca automóvel Toyota. O sucesso da parceria com a Toyota permitiu que em 1971 fosse implementada em Ovar a primeira fábrica europeia desse fabricante automóvel, que ainda se encontra ativa nos dias de hoje.

Com a diversificação das áreas de negócio a um ritmo de crescimento considerável, foi necessário fundar uma *holding* que permitisse gerir, de maneira eficiente, os interesses da empresa. Em 1981 nasce a Grupo Salvador Caetano SPGS, S.A., composta por 4 *sub-holdings*: Toyota Caetano Portugal, Salvador Caetano Indústria, Salvador Caetano Auto e Salvador Caetano Capital. A empresa Caetanobus, S.A, fundada em 2002 por meio de uma parceria com o grupo Daimler-Chrysler, está inserida na *sub-holding* Salvador Caetano Indústria e está localizada na unidade fabril de Oliveira do Douro, em Vila Nova de Gaia. Desde 2010, o Grupo Salvador Caetano é proprietário exclusivo da Caetanobus, S.A. Atualmente, a Caetanobus, S.A. dedica-se à produção de carroçarias para autocarros de transporte urbano, de serviço de turismo e de serviço de aeroporto e a maioria da sua produção tem como destino a exportação.



Figura 1 – Gama de produtos da Caetanobus

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema que este projeto pretende solucionar pode ser dividido em dois subproblemas distintos. Um deles está relacionado com os padrões de qualidade do sistema produtivo enquanto o outro está relacionado com a modernização da linha de produção e com a preocupação com as condições de trabalho.

A qualidade de um produto é bastante importante para o sucesso de uma empresa no mercado a nível nacional e mundial. Na indústria automóvel e nas restantes indústrias, os padrões de qualidade refletem-se em diversas situações que são benéficas para o fabricante. A situação mais evidente é o aumento da qualidade dos acabamentos do produto, que é o primeiro pormenor avaliado por um potencial cliente. No entanto, o aumento da qualidade dos acabamentos não surge como uma melhoria isolada, mas sim como o resultado de uma série de melhorias no sistema produtivo. A capacidade que um robô industrial tem de executar uma dada operação de fabrico seguindo sempre os mesmos parâmetros e sem nunca comprometer a precisão, permite que o produto final tenha um rigor dimensional maior. Uma vez garantida a tolerância dimensional das peças individuais ou dos subconjuntos, o processo de fabrico deixa de necessitar de operações de adaptação em cada produto. Consequentemente, a linha de produção torna-se *standard*, mais expedita e com melhor qualidade de acabamentos, tal como foi mencionado anteriormente.

A necessidade de modernizar as linhas de produção é um problema que surge de forma repetitiva nas empresas. Com o passar dos anos e com a evolução da tecnologia, os equipamentos existentes nas fábricas deixam de estar atualizados e necessitam de ser substituídos. Embora estejam funcionais no momento da substituição, a troca dos mesmos é motivada principalmente pela preocupação com as condições de trabalho. Os novos equipamentos permitem eliminar ou atenuar situações de risco para os operadores, que no caso da soldadura são as atmosferas perigosas e a exposição à radiação e luz intensa. Por fim, a introdução de processos de automação nas linhas de produção permite que o estatuto do operador evolua de executante para supervisor, ficando encarregue de monitorizar o processo de manufatura. Esta evolução de estatuto juntamente com a melhoria das condições de trabalho, tem impacto direto na motivação e na produtividade do operador.

Em suma, o desenvolvimento deste projeto é motivado pelas situações descritas nesta secção, que são uma realidade do quotidiano da Caetanobus.

### **3.3. REQUISITOS TÉCNICOS E LIMITAÇÕES**

O primeiro requisito imposto a este projeto refere-se à implementação de metodologias de desenvolvimento sustentável. A redução de desperdício tecnológico é uma métrica importante para o sucesso deste projeto e consequentemente devem ser feitos todos os

esforços para que o desperdício gerado pela aquisição de um novo equipamento seja reduzido ou eliminado. Neste sentido, a solução final deve contemplar a utilização de um manipulador robótico FANUC Arc Mate 100i-B, com 1373 mm de alcance máximo, que faz parte do inventário de máquinas da Caetanobus. O robô em questão encontra-se aplicado numa célula de soldadura de pequenas dimensões que foi colocada fora de serviço após algumas horas de trabalho, encontrando-se em perfeitas condições para ser reutilizado neste projeto.

Outro requisito importante imposto a este projeto diz respeito ao impacto que o sistema produtivo poderá sofrer com a introdução da nova célula robotizada de soldadura. O sistema produtivo não pode ser afetado de forma drástica, uma vez que existem várias limitações que não poderão ser ultrapassadas a curto e médio prazo. O método de construção de um autocarro desenvolvido pela Caetanobus, ao longo de toda a sua existência, está bastante consolidado em todos os departamentos e, conseqüentemente, torna difícil implementar uma alteração drástica nesse mesmo método. Atualmente, a unidade fabril de Oliveira do Douro, onde se situa a Caetanobus, encontra-se a atravessar uma grave crise de espaço disponível para o chão de fábrica. O aumento da atividade da empresa e o aumento de produtos no seu portefólio levaram à criação de várias infraestruturas e meios auxiliares de produção, reduzindo assim o espaço disponível para instalar uma ou mais células robotizadas. Por esse mesmo motivo, a célula robotizada desenvolvida ao longo deste projeto necessita de ser suficientemente compacta e versátil para permitir a manufatura de componentes destinados a todo o tipo de autocarros produzidos nas instalações da Caetanobus. Considerando ainda a limitação do espaço disponível no chão de fábrica, a nova célula de soldadura deverá permitir a criação de uma nova geração de meios auxiliares de produção, caracterizados pelas dimensões compactas, facilidade em arrumar e facilidade em preparar para serem utilizados pelo sistema produtivo.

As limitações mencionadas no parágrafo anterior estão diretamente ligadas a um requisito crucial deste projeto: a dimensão da área de trabalho. Para ser definida a área de trabalho, foi necessário estudar as dimensões das estruturas produzidas pela Caetanobus durante o ano de 2016 e, após esse mesmo estudo, foi possível identificar as estruturas de maior dimensão: tejadilho e painéis laterais de um autocarro de turismo com 14,3 metros de comprimento. A grande dimensão destas estruturas, situada na ordem da dezena de metros,

verificou-se incompatível com a limitação do espaço disponível na fábrica. De modo a reduzir a dimensão da solução final, optou-se por dividir as estruturas de grande dimensão em duas partes e fixar a dimensão da área de trabalho em 7,5 metros de comprimento por 2,5 metros de largura. Esta alteração do método de fabrico das estruturas não se revelou significativa no método de fabrico global porque apenas foi alterado o fluxo de materiais dentro do sistema produtivo. Desta forma, as estruturas de grande dimensão passam a ser produzidas em duas fases (célula robotizada e processo de união feito por um soldador) ao invés de continuarem a ser produzidas num único gabarito de soldadura.

Os requisitos técnicos associados diretamente ao processo de fabrico e à interação com o operador são bastante importantes e em caso de incumprimento ditam a inviabilidade de todo o projeto. A introdução de uma segunda etapa na produção de grandes estruturas conduz ao aumento dos tempos de fabrico. Por essa razão, a célula robotizada de soldadura deve permitir a implementação de uma metodologia que vise a otimização, e consequente redução desses tempos, por meio de simulação e análise de várias trajetórias possíveis. O processo de interação do operador com a célula de fabrico deve ser simples e seguro. O operador humano apenas deve ser necessário para efetuar operações de carga e descarga de gabaritos e inspeção visual das peças produzidas. Deste modo, torna-se imperativo cumprir a necessidade de fazer chegar o manipulador robótico a todos os pontos de soldadura previstos no desenho técnico da peça. Por forma a garantir a sua segurança em todas as situações, os comandos de controlo devem estar situados fora do perímetro da vedação da célula de soldadura e todos os acessos ao interior da mesma devem ser supervisionados e conectados à paragem de emergência do controlador principal.



# 4. DESENVOLVIMENTO

## 4.1. TEMPESTADE DE IDEIAS

O desenvolvimento de um produto atravessa diversas fases que podem variar conforme a natureza e o destino desse mesmo produto. No entanto, a primeira fase de um processo de desenvolvimento, independentemente do percurso que poderá vir a ter no futuro, é a fase de tempestade de ideias. Durante o período em que ocorre a tempestade de ideias é gerado um elevado número de conceitos, sendo que grande parte destes acabam por ser descartados. Neste capítulo apenas serão descritas as propostas que prevaleceram após a tempestade de ideias.

De todas as ideias geradas nesta primeira fase do processo de desenvolvimento, apenas três se mantiveram para futura análise, sendo que as restantes foram descartadas ainda em fase embrionária devido a falhas técnicas em pontos-chave. As ideias que serão apresentadas de seguida surgiram através de processo de tentativa de melhoria de ideias anteriores. Ou seja, durante esta fase criativa foi tido em consideração um espírito ligeiramente crítico, para que fossem identificados pormenores capazes de comprometer a viabilidade do projeto.

Após essa identificação, surgiram vários conceitos, cada um com uma proposta de melhoria diferente para o pormenor identificado no conceito anterior. Contudo, para não comprometer a importância que a fase de tempestade de ideias tem na inovação da indústria, existiu sempre o cuidado de não identificar certos pormenores como críticos de forma prematura. Ainda nesse sentido, todas as propostas de funcionamento basearam-se em inúmeros produtos de várias indústrias para que os novos conceitos fossem diferenciados das soluções atualmente implementadas com manipuladores robóticos.

O primeiro conceito proposto para este projeto, que passará a ser chamado de conceito A ao longo da dissertação, foi pensado para ser bastante compacto e resistente. Inspirado no funcionamento das pontes rolantes, consiste numa estrutura, denominada de estrutura principal, com quatro apoios no solo, semelhante a uma mesa, e num pórtico responsável por movimentar o manipulador robótico FANUC Arc Mate 100i-B. Inserida no volume criado pela estrutura apoiada no solo, encontra-se a mesa de trabalho que serve de apoio aos gabaritos de soldadura. A mesa de trabalho encontra-se apoiada nas extremidades perpendiculares ao eixo longitudinal e orientada de forma paralela ao plano do solo. A estrutura que forma a mesa de trabalho tem diversas aberturas, de grande dimensão, para permitir que o manipulador robótico alcance os pontos de soldadura presentes na face inferior da peça. Por fim, a operação de carga e descarga da mesa de trabalho é feita pela lateral da estrutura principal com maior comprimento. Deste modo, é garantido que as estruturas de apoio não obstruem o acesso dos trabalhadores. No sentido de facilitar a tarefa de carga e descarga, executada por um trabalhador humano, a mesa de trabalho tem um mecanismo motorizado que a permite posicionar a uma altura variável entre o solo e a altura necessária para executar o movimento giratório.

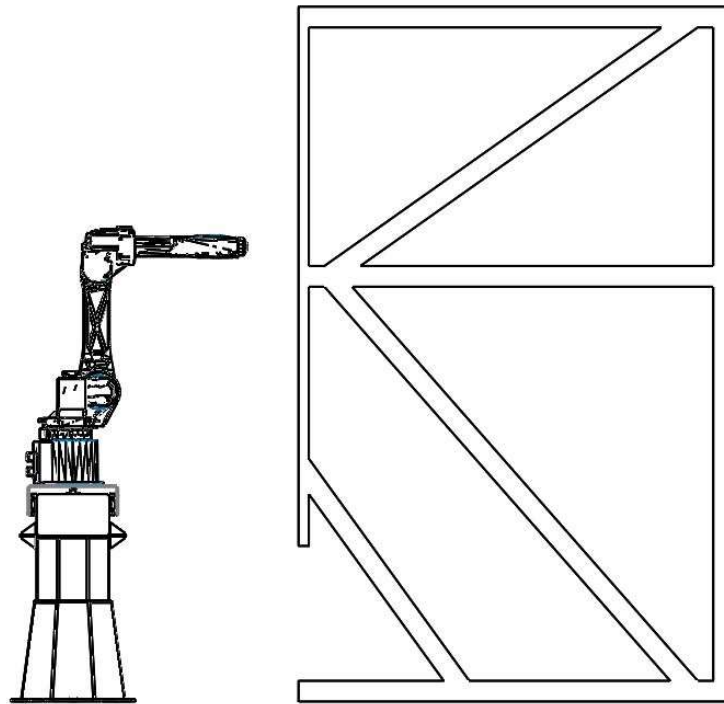


Figura 2 – Conceito A

O segundo conceito proposto, que passará a ser chamado de conceito B, tem uma abordagem diferente do conceito anterior. Enquanto a primeira proposta é focada essencialmente numa estrutura de grande porte para atingir os requisitos de resistência, a proposta do conceito B é focada na simplicidade e no custo de fabrico. Na segunda proposta o manipulador robótico não se desloca por cima da mesa de trabalho, mas sim pela sua lateral, apoiado numa estrutura semelhante a uma bancada de trabalho convencional. A mesa de trabalho é disposta na vertical e, tal como no conceito A, a sua estrutura possui aberturas para permitir que ambas as faces das peças sejam soldadas. Para que o manipulador robótico consiga alcançar os extremos da mesa de trabalho, situados nos pontos mais distantes e mais próximos do solo, a estrutura de transporte do robô posiciona-o de modo a que o plano médio horizontal do seu volume de trabalho coincida com o plano médio horizontal da mesa de trabalho. Ambas as estruturas são paralelas entre si pelo eixo longitudinal e afastadas à distância mínima necessária para operar o robô e realizar a operação de carga/descarga. O processo de carga e descarga é feito com o auxílio

de uma ponte rolante para permitir que os meios auxiliares de produção sejam rodados e elevados até à sua posição de trabalho.

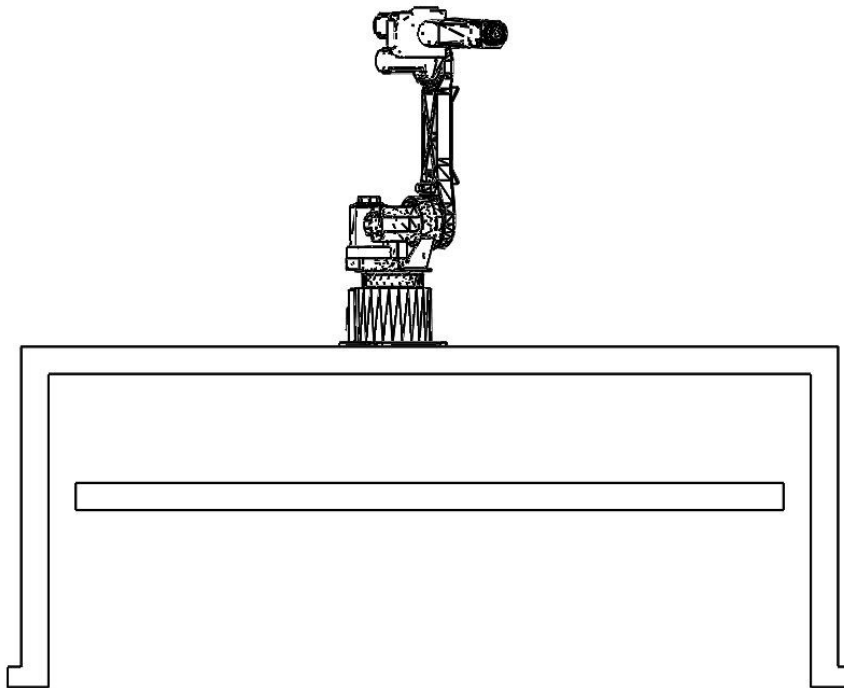


Figura 3 – Conceito B

O terceiro e último conceito proposto, que passará a ser chamado de conceito C, é o último resultado do método iterativo utilizado durante a fase de tempestade de ideias. Esta proposta procura obter o melhor compromisso entre resistência, custo de fabrico e funcionalidade. Tal como foi proposto no conceito B, esta ideia é constituída por duas estruturas alinhadas longitudinalmente e independentes. Uma das estruturas tem a função de transportar o robô ao longo de um eixo e a outra estrutura tem a função de servir de apoio aos gabaritos de soldadura. À primeira vista é possível identificar uma enorme semelhança entre este conceito e o conceito B, dado que o método utilizado para transportar o manipulador é o mesmo. No entanto, o conceito C recupera a orientação horizontal da mesa de trabalho, mas incorpora um eixo de rotação no respetivo componente. Sem esta adição não seria possível alcançar todos os pontos da mesa de trabalho, visto que o alcance do robô FANUC Arc Mate 100i-B é inferior à largura da

mesma. A simplicidade das estruturas que constituem o conceito C também contribuem para o acesso bastante amplo, por parte dos trabalhadores, para operações de carga e descarga. Tal como foi proposto no primeiro conceito, a mesa de trabalho tem um mecanismo motorizado que permite posicioná-la em diferentes alturas, com o intuito de facilitar as operações de carga e de descarga dos gabaritos.



Figura 4 – Conceito C

## 4.2. ANÁLISE SWOT DAS ALTERNATIVAS

Com a fase de criação de conceitos concluída, é necessário avaliar o potencial de cada proposta e estabelecer comparações para que sirvam de suporte a decisões futuras. Existem vários métodos que visam avaliar uma ideia e determinar a sua viabilidade. As avaliações podem ser feitas através de vários métodos, onde se incluem métodos baseados na intuição, na experiência e no princípio de tentativa-erro. Um método que é largamente adotado por ser bastante eficiente e versátil, enquanto analisa um conjunto alargado de fatores, é o

método de análise SWOT. O acrónimo SWOT é utilizado em representação do termo “*Strength, Weakness, Opportunities and Threats*”. Esta metodologia de avaliação não só identifica as vantagens e desvantagens de uma ideia, mas também revela os momentos que a poderão favorecer ou prejudicar.

Pelas vantagens mencionadas anteriormente, o método de análise SWOT foi selecionado para realizar a avaliação do potencial de cada ideia. Cada proposta sofreu uma análise independente e o resultado desse processo é apresentado nas tabelas seguintes.

Tabela 1 – Análise SWOT do conceito A

<b>Conceito A</b>	
<b>Pontos Fortes</b>	<b>Pontos Fracos</b>
Robustez da estrutura da mesa de trabalho Robustez da estrutura de movimento do robô	Sistema mecânico para elevar a mesa bastante complexo  Método de carga e descarga exige muito espaço disponível na fábrica
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Introdução de um eixo externo rotativo para facilitar o acesso à peça	Custo de fabrico pode inviabilizar a rentabilidade do projeto

Tabela 2 – Análise SWOT do conceito B

<b>Conceito B</b>	
<b>Pontos Fortes</b>	<b>Pontos Fracos</b>
Robustez da estrutura de movimento do robô Sistemas mecânicos simples reduzem o custo de fabrico	A estrutura de apoio dos meios auxiliares de produção tem pouca estabilidade  O processo de instalação dos meios auxiliares de produção é complexo

<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Introdução de um eixo rotativo para facilitar o acesso à peça	A instabilidade da estrutura de apoio dos meios auxiliares de produção pode comprometer a precisão do processo de fabrico

Tabela 3 – Análise SWOT do conceito C

<b>Conceito C</b>	
<b>Pontos Fortes</b>	<b>Pontos Fracos</b>
Robustez da estrutura de movimento do robô Eixo externo rotativo facilita o acesso à peça	Solução com número maior de sistemas mecânicos Sistemas mecânicos bastante complexos
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Sistema de rotação da mesa de trabalho acelera o tempo de ciclo	Mesa de trabalho rotativa retira resistência à estrutura e pode comprometer a precisão do processo de fabrico

### **4.3. SELEÇÃO DA ALTERNATIVA**

As três análises SWOT permitiram ter, tal como era esperado, uma visão bastante completa de cada conceito. Para dar continuidade ao projeto, foi necessário escolher a proposta com maior potencial para cumprir os requisitos especificados no capítulo anterior.

O conceito selecionado para dar continuidade ao projeto foi o terceiro (e último) a ser proposto: o conceito C. No entanto, todos os outros conceitos propostos eram passíveis de serem concretizados e implementados em fábrica. A principal razão para descartar o conceito A foi a complexidade inerente ao projeto mecânico das estruturas que compõe a célula. Tal como foi mencionado na análise de viabilidade, os pontos críticos da primeira proposta dizem respeito às deformações causadas pelo pórtico em movimento ao longo da estrutura e pelo próprio manipulador robótico montado no pórtico. Uma vez que este

projeto procura um grau considerável de precisão, seria necessário desenvolver um conjunto de estruturas relativamente complexas para ultrapassar o prolema mencionado. Além do tempo de projeto necessário para projetar essas mesmas estruturas, o custo associado à produção das mesmas seria consideravelmente superior ao das restantes propostas.

Apesar do segundo conceito proposto não ter o mesmo problema que o conceito A tem com as deformações da estrutura, este tem um problema que se iria revelar grave a longo prazo. Dado que a mesa de trabalho está posicionada na vertical e não possui movimento giratório, os trabalhadores enfrentariam uma tarefa complicada para carregar e descarregar as peças e os gabaritos de soldadura. Também foi tido em conta o fator de risco de acidentes de trabalho existente devido à possibilidade de o trabalhador ter de subir até uma altura de aproximadamente 3 metros para efetuar as suas tarefas.

Por fim, ambas as propostas possuem uma desvantagem em relação ao conceito C, relacionada com a capacidade de a célula permitir soldar as peças em ambas as faces (face exposta e face coincidente com a mesa de trabalho). Ainda que esteja prevista a existência de aberturas na mesa de trabalho, a proposta selecionada revela-se muito mais vantajosa devido ao movimento giratório da sua mesa de trabalho. As aberturas por si só não garantem que o robô consiga chegar à posição ideal para concretizar a operação de soldadura e também não garantem que a mesa de trabalho seja compatível com algumas peças desenvolvidas no futuro. Neste sentido, o movimento giratório da mesa de trabalho, presente no conceito selecionado, permite que o robô tenha à sua disposição um conjunto mais alargado de posições para efetuar uma operação de soldadura num dado ponto. A maior adaptabilidade da mesa giratória a futuras peças também é evidente e contribuiu para a decisão de selecionar a terceira e última ideia apresentada.

#### **4.4. ANTEPROJETO: SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO**

A fase de análise do anteprojeto é crucial para o desenvolvimento bem-sucedido do projeto. Nesta fase é essencial obter a confirmação da exequibilidade de todas as decisões tomadas anteriormente. Inerente ao estudo e confirmação do anteprojeto, encontra-se a decisão do tipo de programação que será implementado com a célula de fabrico: programação *online* ou programação *offline*.

A metodologia de programação *online* surgiu no início dos anos 80 e alguns anos mais tarde, para tentar superar algumas dificuldades observadas, foi criada a metodologia de programação *offline*. Atualmente, existem diversas aplicações robotizadas implementadas com programação *online* e têm sido feitas propostas para melhorar cada vez mais esta filosofia de programação. As duas grandes vantagens que mantêm a programação *online* na lista de opções são a simplicidade de uso e o baixo valor de investimento necessário. Contudo, a programação *online* possui alguns fatores limitativos, tais como a dificuldade em visualizar as trajetórias do robô e a necessidade de aceder fisicamente à célula, e por essas razões não é apropriada para este projeto.

Nas indústrias que lidam frequentemente com componentes de grande dimensão é comum ser implementada a filosofia de programação *offline*. Comparativamente à programação *online*, esta última metodologia de programação apresenta vantagens significativas e ajuda a simplificar o processo de desenvolvimento da célula de fabrico. Uma vez que a programação do robô é feita com recurso a um ambiente gráfico tridimensional, é possível definir os pontos e as trajetórias com precisão e com a garantia que não existem colisões de qualquer natureza, mesmo com peças com geometrias complexas. O mesmo *software* também permite assegurar que o manipulador robótico consegue alcançar todos os pontos desejados e medir o tempo de ciclo, com recurso a uma simulação em computador. A modificação e reutilização dos programas também são fatores que influenciam consideravelmente a escolha feita para este projeto. Através do *software* de programação é possível efetuar alterações aos programas existentes ou criar variantes de um programa com rapidez, o que minimiza consideravelmente o tempo de preparação da produção. Relativamente à criação de programas totalmente novos, a utilização de *software* de forma *offline* reduz o tempo de paragem da célula de fabrico até 85%. A principal razão para esta redução drástica é a capacidade de prever e preparar a produção atempadamente sem ser necessário aceder fisicamente à célula e ao conjunto de componentes que servem como matéria-prima. Todavia, para tirar partido destas vantagens é necessário ter cuidados de manutenção rigorosos porque a calibração de todo o sistema é fulcral para a precisão e bom desempenho. Além disso, é necessário realizar um investimento em sistemas informáticos capazes de criar modelos tridimensionais e de lidar com o *software* de programação. No entanto, apesar das desvantagens referidas, a metodologia de programação *offline* é a mais apropriada para este projeto.

Dado que o robô utilizado neste trabalho é do fabricante FANUC, será utilizado o *software* de programação específico para tarefas de soldadura chamado de ROBOGUIDE WELD PRO. A modelação da célula de fabrico é o primeiro passo e o mais importante. Contudo, para simplificar e agilizar a execução deste passo, apenas são modelados o conjunto de peças a fabricar e os componentes com movimento: mesa de trabalho, posicionador linear externo do robô e posicionador rotativo da mesa de trabalho. Ambos os posicionadores são representados por modelos presentes na biblioteca do *software*, mas com o cuidado de manter os eixos nas posições absolutas, para auxiliar a redução de tempo despendido na modelação e configuração da célula de fabrico.

Após a programação das trajetórias foi possível determinar que o robô consegue alcançar todos os pontos de soldadura pretendidos, confirmando a exequibilidade do anteprojecto. Com recurso à simulação *offline* também foi possível estimar o tempo de ciclo em 17 minutos. Porém, as trajetórias utilizadas nesta análise preliminar não se encontram otimizadas e deixam espaço para um futuro trabalho de melhoria contínua, a ser executado na altura da implementação.

#### **4.5. PROJETO MECÂNICO**

A fase de projeto mecânico é uma etapa com bastante importância no desenvolvimento do projeto. Tomando como ponto de partida os requisitos especificados anteriormente, pretende-se criar um conjunto de equipamentos industriais com a precisão necessária para desempenhar as tarefas previstas, com elevada fiabilidade, de fácil manutenção e com o menor custo possível. No final, os equipamentos desenvolvidos deverão ser capazes de se interligar entre si e com o manipulador robótico para formar a célula robotizada de soldadura. Apesar de ser uma fase de projeto mecânico, nesta altura da conceção da solução existe uma grande articulação com a fase de projeto elétrico. Isto acontece uma vez que é necessário escolher certos componentes elétricos, tais como sensores e motores, para prosseguir com o desenho de alguns componentes mecânicos, tais como estruturas móveis e suportes. Por esse motivo, durante a fase de projeto mecânico existiu um ciclo iterativo ao longo da conceção de várias soluções individuais para problemas específicos de uma dada funcionalidade. De forma a atingir os objetivos estabelecidos, foi necessário estruturar a fase do projeto mecânico e dividi-la em tarefas menos complexas. Então, antes do projeto mecânico ser iniciado, o mesmo estava estruturado da seguinte forma:

- desenvolvimento de conceito;
- dimensionamento;
- desenho de fabrico.

Na fase de desenvolvimento de conceito foram estudadas várias soluções para movimentar os diferentes componentes da célula durante a sua operação. Os mecanismos abordados nesta fase foram aqueles que dizem respeito à elevação e rotação da mesa de trabalho.

Após o estudo dos mecanismos descritos, seguiu-se a representação tridimensional, em Solidworks, dos vários equipamentos que constituem a célula robotizada de soldadura. A célula desenvolvida ao longo desta dissertação é composta por vários equipamentos que não possuem qualquer interligação entre si. Deste modo, será feita uma análise individual e independente para cada um deles.

Os componentes mecânicos analisados ao longo deste capítulo são os seguintes:

- mecanismo de translação do eixo linear externo;
- mecanismo de elevação da mesa de trabalho;
- mecanismo de rotação do eixo rotativo externo;
- mesa de trabalho.

Durante a elaboração do modelo tridimensional do equipamento, recorreu-se a cálculos e *software* apropriado para validar as escolhas efetuadas ou para determinar qual é o requisito mínimo para um dado parâmetro, como por exemplo a espessura de um elemento estrutural. Os cálculos de dimensionamento foram executados com auxílio da bibliografia do fabricante de alguns componentes e com auxílio do módulo de cálculo por elementos finitos do Solidworks. Na maioria dos projetos, existe um processo iterativo entre desenvolvimento do primeiro conceito, o dimensionamento/validação do conceito, a otimização do conceito e o novo dimensionamento/validação. Na secção de projeto mecânico pretende-se mostrar a evolução iterativa que os vários componentes sofreram ao longo da fase de desenvolvimento através da apresentação dos conceitos, análise dos

cálculos de dimensionamento/validação e apresentação da proposta de melhoria do conceito analisado.

#### **4.5.1 Mecanismo de translação do eixo linear externo**

O eixo linear externo é o sistema eletromecânico que confere a capacidade de o manipulador robótico conseguir trabalhar peças de grande comprimento. Uma vez que o robô considerado para este projeto possui um alcance de apenas de 1373 mm, a utilização de um eixo linear externo é imperativa para conseguir produzir as estruturas das carroçarias. Apesar de se apresentar como um desafio relativamente simples de resolver, foram necessários alguns cuidados durante a fase de concepção para que a precisão do movimento fosse garantida.

A primeira tarefa do processo de concepção foi selecionar o tipo de mecanismo utilizado para movimentar o robô. Atendendo aos requisitos do eixo linear e à análise feita no início do capítulo, concluiu-se que o mecanismo mais adequado para proporcionar o movimento de translação é o de pinhão e cremalheira. Uma vez que o manipulador robótico tem de percorrer uma distância que ronda os 9 m, qualquer outro mecanismo foi considerado inadequado devido a limitações da oferta do mercado ou devido a limitações físicas. Todavia, a eficiência do sistema não dependeu somente da escolha correta do mecanismo de translação. O tipo de acionamento selecionado teve uma grande influência no sucesso do mesmo, uma vez que a velocidade e precisão do movimento dependeu, na grande maioria, desse componente. O acionamento escolhido para equipar o eixo linear externo foi um servomotor fabricado pela Fanuc, com o intuito de obter uma integração direta com o controlador e um controlo de alta precisão.

Após a definição geral do mecanismo, foi necessário realizar cálculos de dimensionamento para determinar o binário e a velocidade angular requerida ao motor para movimentar o robô. Os primeiros parâmetros a definir foram as dimensões e material do pinhão e da cremalheira. Tendo por base as guias lineares escolhidas e a oferta do mercado para pinhões e cremalheiras, foram selecionados do catálogo componentes com as seguintes especificações:

Tabela 4 – Especificação técnica do pinhão do eixo linear externo

Diâmetro Exterior ( $D$ )	130 mm
Diâmetro Interior ( $d$ )	20 mm
Largura	30 mm
Módulo	3 mm
Material	Aço zincado

De seguida, foram determinados, com base na análise empírica de outras células robotizadas, os valores a atribuir a variáveis do sistema e condições de funcionamento, tais como: rendimento dos componentes mecânicos, velocidade máxima, aceleração máxima e massa máxima a transportar.

Tabela 5 – Especificação do sistema mecânico do eixo linear externo

Rendimento do motor ( $\eta_{motor}$ )	98 %
Rendimento da transmissão ( $\eta_{transmissão}$ )	70 %
Rendimento das guias lineares ( $\eta_{guias}$ )	90 %
Massa máxima admissível ( $m$ )	200 kg
Velocidade máxima ( $v$ )	0,5 m/s
Aceleração máxima ( $a$ )	0,25 m/s <sup>2</sup>
Tempo de aceleração	2 s

Uma vez que os requisitos do sistema foram definidos em função de uma velocidade linear, foi necessário calcular a velocidade angular do servomotor:

$$v = w \cdot r$$

$$0,5 = w * 0.065$$

$$w = 7,69 \text{ rad/s}$$

Equação 1 – Cálculo da velocidade angular do servomotor

De seguida, foi calculada a potência mínima requerida ao motor para realizar o movimento de translação, após aceleração, de acordo com os critérios estabelecidos:

$$P = \frac{m * a * v}{\eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{pinhão}} * \eta_{\text{guias}}}$$

$$P = \frac{200 * 0,25 * 0,5}{0,98 * 0,7 * 0,9}$$

$$P = 40,5 \text{ W}$$

Equação 2 – Cálculo da potência mínima requerida

Sabendo os valores da potência e da velocidade do motor, foi possível calcular o binário necessário em regime permanente:

$$P = T * \omega$$

$$40,5 = T * \frac{2 * \pi * 73,46}{60}$$

$$T = 5,26 \text{ N.m}$$

Equação 3 – Cálculo do binário em regime permanente

Uma vez conhecidos os requisitos mecânicos para manter o sistema em funcionamento durante o regime permanente, procedeu-se aos cálculos dos mesmos requisitos para a fase de aceleração.

$$T = I * \alpha$$

$$T = (I_{\text{pinhão}} + I_{\text{massa}}) * \alpha$$

Equação 4 – Cálculo do binário de aceleração

Sabendo que:

$$I_{\text{pinhão}} = \frac{1}{8} \times m_{\text{pinhão}} \times (D^2 + d^2)$$

$$I_{\text{pinhão}} = \frac{1}{8} * 3,0518 * (0,130^2 + 0,02^2)$$

$$I_{\text{pinhão}} = 0,0066 \text{ kg. m}^2$$

Equação 5 – Cálculo do momento de inércia do pinhão

$$I_{\text{sistema}} = m * D^2$$

$$I_{\text{sistema}} = 200 * 0,130^2$$

$$I_{\text{sistema}} = 0,845 \text{ kg. m}^2$$

Equação 6 – Cálculo do momento de inércia total do sistema mecânico

$$\alpha = \frac{\frac{2 * \pi * N}{60}}{\text{Tempo de aceleração}}$$

$$\alpha = \frac{\frac{2 * \pi * 73,46}{60}}{2}$$

$$\alpha = 3,846 \text{ rad/s}^2$$

Equação 7 – Cálculo da aceleração angular

Pode-se concluir que:

$$T = (0,0066 + 0,845) * 3,846$$

$$T = 3,28 \text{ N. m}$$

Uma vez conhecidas as necessidades do motor durante a fase de aceleração e durante a fase de regime permanente, foi possível calcular o binário total requerido pelo motor:

$$T_{total} = T_{perm} + T_{acel}$$

$$T_{total} = 5,26 + 3,28$$

$$T_{total} = 8,54 \text{ N.m}$$

Equação 8 – Cálculo do binário total teórico requerido pelo sistema mecânico

Após uma consulta dos servomotores disponibilizados no mercado pela Fanuc, foi selecionado o servomotor  $\beta 12/3000/is$ , cuja curva de funcionamento confirma a capacidade para desempenhar a função pretendida. No entanto, os cálculos anteriores não contemplaram a inércia do veio ( $I = 0,00228 \text{ kg.m}^2$ ) do servomotor dado que esta só foi conhecida depois de este ser escolhido. Assim sendo, foram executados cálculos de verificação para garantir que o binário total requerido pelo motor era menor que o binário disponibilizado pelo servomotor a 73 RPM (aproximadamente 11 N.m).

$$T_{total} = 5,26 + (0,0066 + 0,845 + 0,0228) * 3,846$$

$$T_{total} = 8,55 \text{ N.m}$$

Equação 9 – Cálculo do binário total real requerido pelo sistema mecânico

O dimensionamento permitiu confirmar os parâmetros de utilização da célula relativos à massa máxima admissível e à velocidade máxima de deslocamento. Uma vez conhecido o valor máximo da massa a deslocar sobre o mecanismo, procedeu-se à verificação das condições de resistência estrutural. Ou seja, dado que o robô e os restantes equipamentos periféricos estão apoiados em duas guias lineares e conseqüentemente numa estrutura base fixa ao solo, foi necessário analisar as deformações causadas pelo peso do robô no ponto crítico. A deformação da estrutura de apoio é tao importante quanto a da mesa de trabalho, uma vez que ambas têm um forte impacto na precisão da tarefa de fabrico, tal como é explicado na subsecção relativa à mesa de trabalho.

Para determinar a zona crítica da estrutura de apoio, analisou-se a sua forma e construção para perceber de que maneira é que as cargas são aplicadas e provocam alterações. Tal

como é possível visualizar na figura 5, o chassis é composto por vários segmentos de estrutura repetidos, apelidados de módulos. A zona mais frágil do módulo é ao centro deste, a uma distância igual de ambas extremidades, onde existem menos elementos resistentes e o efeito de momento de uma força é maior.

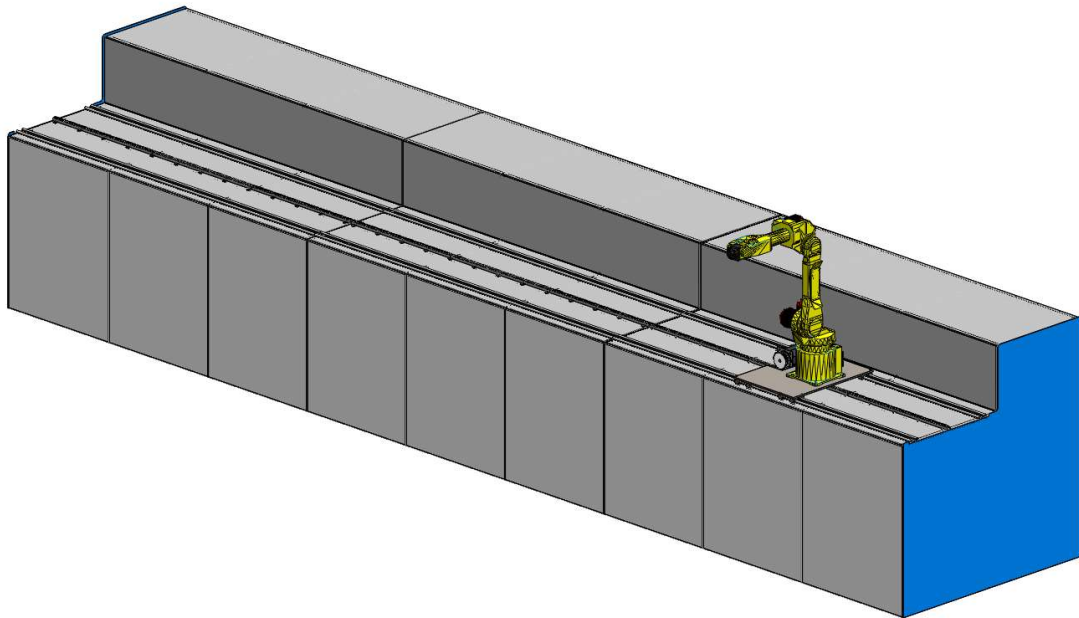


Figura 5 – Representação isométrica do eixo linear externo

Após a determinação da zona crítica, a estrutura de apoio foi reduzida a um módulo, para efeitos de análise estrutural, e aplicou-se uma carga de 200 kg nos elementos estruturais de apoio das guias lineares. Para validar o comportamento da estrutura foram observados dois parâmetros: tensão máxima registada e a deformação máxima registada. O critério de resistência estrutural foi cumprido com sucesso, dado que a tensão máxima registada foi de 8 MPa.

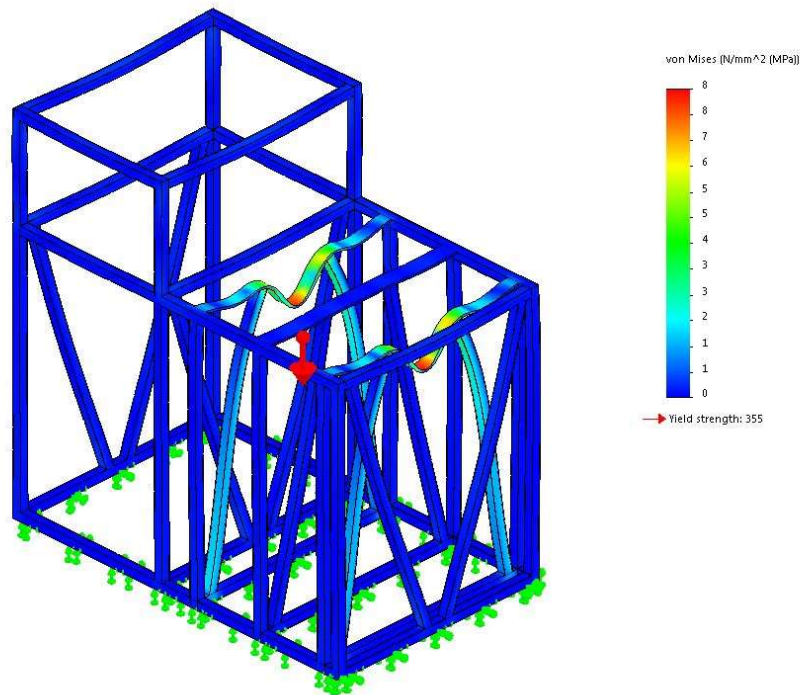


Figura 6 – Análise de tensões na estrutura do eixo linear externo

Dado que a tensão máxima registada durante um ensaio e a deformação causada pela mesma carga possuem uma relação direta, esperava-se que a deformação causada pela massa máxima admissível não provocasse deformações significativas. Conforme é apresentada na figura 7, a deformação máxima registada durante a simulação foi bastante reduzida, tal como era expectável, sendo igual a 0.1 mm.

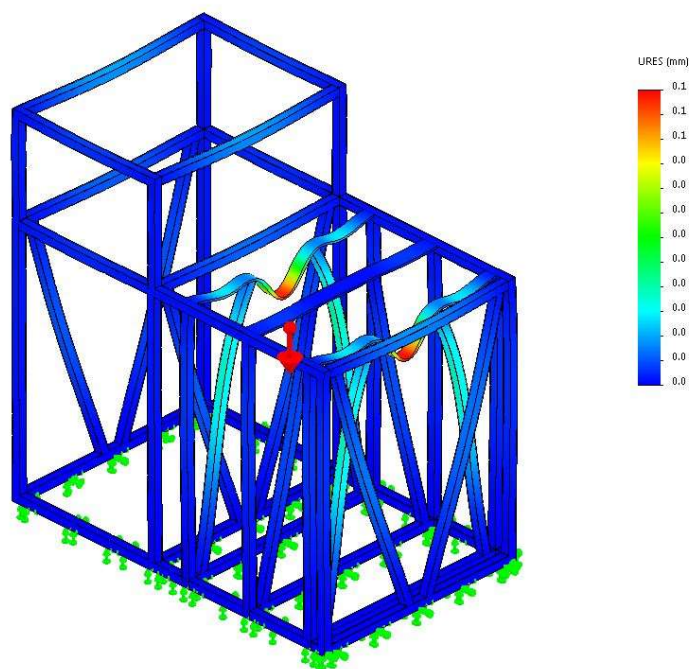


Figura 7 – Análise das deformações na estrutura do eixo linear externo

Tendo em conta que os valores registados foram bastante reduzidos, estes foram considerados desprezáveis e sem qualquer prejuízo na precisão e robustez da célula robotizada de soldadura.

#### 4.5.2 Mecanismo de elevação da mesa de trabalho

O mecanismo de elevação da mesa de trabalho diz respeito a todos os componentes responsáveis por movimentar a mesa, de forma vertical, desde a sua posição de carga e descarga, junto ao solo, até à sua posição de trabalho. A posição de trabalho da mesa situa-se a 1375 mm de altura, medida desde o solo até à face superior.

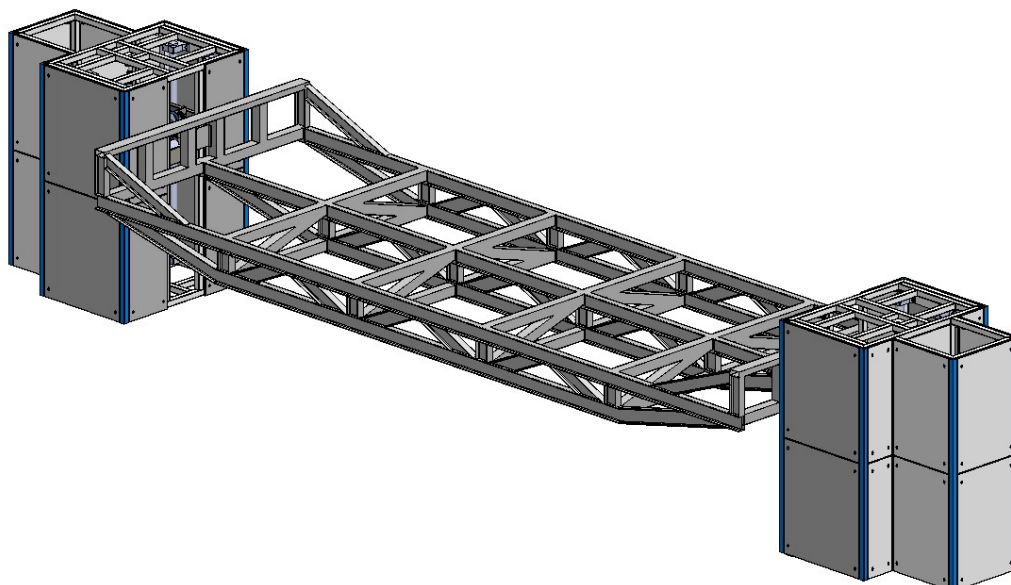


Figura 8 – Representação isométrica do conjunto de elevação da mesa de trabalho

O mecanismo selecionado para executar o movimento de ascensão foi o mecanismo de fuso e fêmea e, uma vez que o motor não tem acoplamento direto ao fuso, foi escolhida uma corrente metálica para transmitir o binário entre os dois elementos.

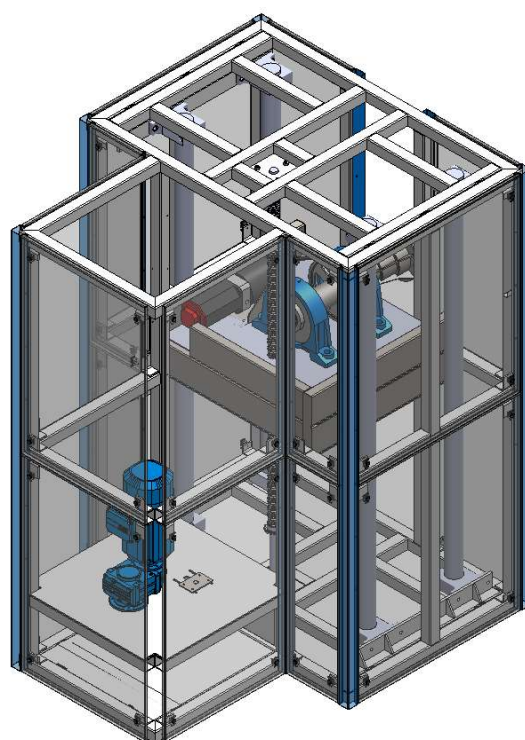


Figura 9 – Detalhe do mecanismo de elevação da mesa de trabalho

De todas as vantagens mencionadas anteriormente, a que mais contribuiu para a seleção deste mecanismo foi a capacidade de garantir uma elevada precisão do movimento. Todavia, a capacidade para aguentar grandes cargas axiais, impostas pela elevada massa da mesa de trabalho, e a suavidade do movimento também foram determinantes para a decisão. O tipo de fuso escolhido foi o fuso de esferas para potenciar todas as vantagens mencionadas face ao fuso de rosca trapezoidal.

Relativamente ao acionamento, foi selecionado um motor de indução de corrente alternada com alimentação trifásica e travão, juntamente com uma caixa redutora. A existência de um travão no motor é fundamental para garantir a segurança da célula e do operador durante o seu funcionamento.

O primeiro desafio foi resolver o posicionamento do motor: acoplado diretamente ou posicionamento paralelo. Na opção de acoplamento direto existiam duas alternativas, sendo que uma delas englobava uma caixa redutora de veios paralelos posicionada no topo do fuso e a outra englobava uma caixa redutora de parafuso sem fim, também acoplada ao fuso no topo deste. O posicionamento na base do fuso foi excluído desde o início da conceção, uma vez que a plataforma ocupa esse espaço quando se encontra em carga ou descarga da mesa trabalho. No entanto, apesar de o desafio ser facilmente resolvido com o posicionamento do motor no topo, esta alternativa acarreta uma desvantagem associada à montagem e manutenção do equipamento. O facto de o motor estar montado no topo da estrutura e tendo em conta a geometria da mesma, aceder ao local do motor tanto para montagem como para manutenção revelou-se uma tarefa pouco ergonómica.

De modo a solucionar a questão de posicionamento do motor, foi escolhida uma caixa redutora de veios paralelos e o conjunto foi posicionado na parte traseira da estrutura. Esta decisão revelou-se, mais tarde, uma opção com mais vantagens além da ergonomia da tarefa de montagem e manutenção. Apesar de ser diminuta, a massa do conjunto formado pelo motor e pela caixa redutora contribuiu para o equilíbrio das massas aplicadas na torre de elevação da mesa de trabalho, tendo impacto direto no posicionamento do centro de massa do componente e na resistência ao balanço gerado pela mesa de trabalho. Para minimizar a complexidade inerente à solução, definiu-se como requisito que o veio de saída da caixa redutora deveria ser suficiente para acoplar um carroto e fazer a ligação ao fuso. Desta forma, eliminou-se a necessidade de fabricar um segundo veio e um

acoplamento ao veio de saída da caixa redutora. Contudo, a utilização do veio de saída da caixa redutora, da forma como foi descrito, implicou que não fosse usado um rolamento de apoio e que a carga gerada pela pré-carga da corrente metálica fosse suportada pelos rolamentos da caixa redutora. Este pormenor não impossibilitou a montagem do mecanismo conforme proposto, mas exigiu que fosse verificada a resistência da caixa redutora em situação de esforço radial.

A tarefa que se seguiu à definição de funcionamento do mecanismo de elevação da mesa de trabalho foi o de dimensionamento da potência e binário necessários para movimentar a estrutura carregada com o seu peso máximo admissível. Para efetuar o dimensionamento de forma correta foi consultado o manual do fornecedor do fuso de esferas e tido em conta diversos fatores, tais como o curso de elevação, a velocidade de elevação e a aceleração do movimento.

De acordo com o manual do fabricante, o fuso de esferas deve ter um coeficiente de segurança (*CS*) igual ou superior a 3 para a situação de carga máxima admissível. Isto significa que a carga máxima admissível do fuso selecionado deve ser três vezes superior à carga máxima aplicada no mesmo. Portanto, para determinar a carga máxima admissível do fuso foram efetuados os seguintes cálculos:

$$CS = \frac{\text{Carga máx adm. fuso}}{\text{Carga máxima aplicada}}$$

$$3 = \frac{\text{Carga máx adm. fuso}}{4000 * 9,81 * 0,5}$$

$$\text{Carga máx adm. fuso} = 58860 \text{ N}$$

Equação 10 – Cálculo da carga máximo admissível no fuso de elevação

Com base no valor calculado, foi consultado o manual do fabricante com o objetivo de determinar o fuso de esferas adequado.

Size $d_0 \times P \times Dw - i$	Part number	Load ratings		Speed* $v_{max}$ [m/min]
		dyn. C (N)	stat. C <sub>0</sub> (N)	
16 x 5R x 3 - 4	1502-0-1023	12300	16100	30
20 x 5R x 3 - 4	1502-1-1033	14300	21500	30
25 x 5R x 3 - 4	1502-2-1033	15900	27200	30
25 x 10R x 3 - 4	1502-2-4033	15700	27000	60
32 x 5R x 3.5 - 4	1502-3-1033	21600	40000	23
32 x 10R x 3.969 - 5	1502-3-4033	31700	58300	47
40 x 5R x 3.5 - 5	1502-4-1033	29100	64100	19
40 x 10R x 6 - 4	1502-4-4033	50000	86400	38
40 x 10R x 6 - 6	1502-4-4034	72100	132200	38
40 x 20R x 6 - 3	1502-4-7033	37900	62800	75
50 x 5R x 3.5 - 5	1502-5-1033	32000	81300	15
50 x 10R x 6 - 4	1502-5-4033	55400	109000	30
50 x 10R x 6 - 6	1502-5-4034	79700	166500	30
50 x 20R x 6.5 - 5	1502-5-7034	75700	149700	60
63 x 10R x 6 - 4	1502-6-4033	61800	140500	24
63 x 10R x 6 - 6	1502-6-4034	88800	214300	24
63 x 20R x 6.5 - 5	1502-6-7034	83900	190300	48
80 x 10R x 6.5 - 6	1502-7-4034	108400	291700	19
80 x 20R x 12.7 - 6	1502-7-7004	262700	534200	30
100 x 10R x 6.5 - 6	1502-8-4024	119500	371900	10
100 x 20R x 12.7 - 6	1502-8-7024	295100	686400	20
125 x 10R x 6.5 - 6	1502-9-4024	130600	468700	8
125 x 20R x 12.7 - 6	1502-9-7024	326500	870400	16

Figura 10 – Gama de produtos Bosch

Uma vez que se trata de um sistema que inclui movimento, a seleção do fuso foi efetuada através das cargas máximas para situações dinâmicas. Contudo, dado que o fabricante não disponibiliza nenhum fuso que suporte exatamente 58860 N para uma situação de movimento, foi escolhido o fuso com a carga máxima mais aproximada por excesso. O componente selecionado foi o Bosch FDM-E-S 50x10Rx6-6, capaz de aguentar até 79700 N em situações dinâmicas.

Com base nos valores máximos do componente escolhido é possível determinar o coeficiente de segurança real:

$$CS(Real) = \frac{Carga\ máx\ adm.\ fuso}{Carga\ máxima\ aplicada}$$

$$CS(Real) = \frac{79700}{4000 * 9,81 * 0,5}$$

$$CS(Real) = 4,06$$

Equação 11 – Cálculo do coeficiente de segurança real

O fenómeno de encurvadura associado à aplicação de uma carga axial numa coluna também estudado para validar a aplicação do fuso de esferas mencionado. Apesar de o fabricante mencionar que o componente é capaz de suportar até 79700 N quando solicitado axialmente, não se encontram garantidas todas as condições de segurança de utilização. Isto acontece uma vez que o fenómeno de encurvadura está diretamente relacionado com o comprimento do fuso e com a maneira em que está apoiado.

O dimensionamento do fuso de esferas em relação a esta matéria foi realizado de acordo com a fórmula de Euler para a determinação da carga crítica. Desta forma, pretendeu-se determinar o limite superior do intervalo de cargas que o fuso é capaz de suportar sem deformar lateralmente, que também é denominado de carga crítica. Nesta situação específica foi utilizada a fórmula correspondente a uma coluna biarticulada, cujos apoios apenas permitem rotação.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2}$$

Equação 12 – Cálculo da carga crítica aplicada no fuso

Considerando uma primeira iteração, os valores das constantes correspondentes ao módulo de elasticidade e ao momento de inércia da secção do fuso foram determinados por aproximação, de forma a simplificar os cálculos iniciais. Assim sendo, o módulo de elasticidade considerado foi o do aço e o momento de inércia foi calculado com base numa secção com 50 mm de diâmetro. O valor da constante correspondente ao comprimento do fuso foi extraído dos desenhos de fabrico e é igual a 2.09 m.

Assim sendo, temos que:

$$I = \frac{1}{4} * \pi * r^4$$

$$I = \frac{1}{4} * \pi * 0,025^4$$

$$I = 3,068 * 10^{-7} m^4$$

Equação 13 – Cálculo do momento de inércia do fuso

E que:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 2,06 * 10^{11} * 3,068 * 10^{-7}}{2,09^2}$$

$$P_{cr} = 142786 \text{ N}$$

Uma vez que o valor da carga crítica calculada é superior ao valor máximo determinado pelo fabricante, foi determinado que o fuso de esferas garante todas as condições de segurança necessárias.

Seguidamente, passou-se para o dimensionamento do conjunto motor e caixa redutora necessário para executar o movimento. O primeiro requisito a calcular foi o binário exigido à saída do conjunto, seguindo o método de cálculo proposto pelo fabricante:

$$T = \frac{F * P}{2000 * \pi * \eta}$$

$$T = \frac{58860 * 10}{2000 * \pi * 0,9}$$

$$T = 104,1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Equação 14 – Cálculo do binário requerido pela caixa redutora

Tal como aconteceu na determinação do fuso de esferas, o fornecedor de motores elétricos e de caixas redutoras não disponibiliza nenhum conjunto com um binário de 104,1 N.m. Após uma pesquisa dos produtos disponibilizados pelo fornecedor, surgiram as duas hipóteses seguintes:

- motorreductor de eixos paralelos SK2282-112MH/4, 4 kW, 319 RPM e 120 N.m
- motorreductor de eixos paralelos SK2282-100AH/4, 3 kW, 249 RPM e 115 N.m

Sendo que ambas as opções são capazes de executar o movimento de elevação da mesa, a escolha baseou-se na velocidade angular e no respetivo tempo de elevação. O conjunto escolhido foi o motorreductor de eixos paralelo SK2282-112MH/4 que permite um tempo de elevação de 26,3 s face aos 33,7 s permitidos pela segunda hipótese.

### 4.5.3 Mecanismo de rotação do eixo rotativo externo

O eixo rotativo externo é essencial para conferir à célula robotizada de soldadura o grau de liberdade necessário para o manipulador robótico alcançar todos os pontos da mesa de trabalho.

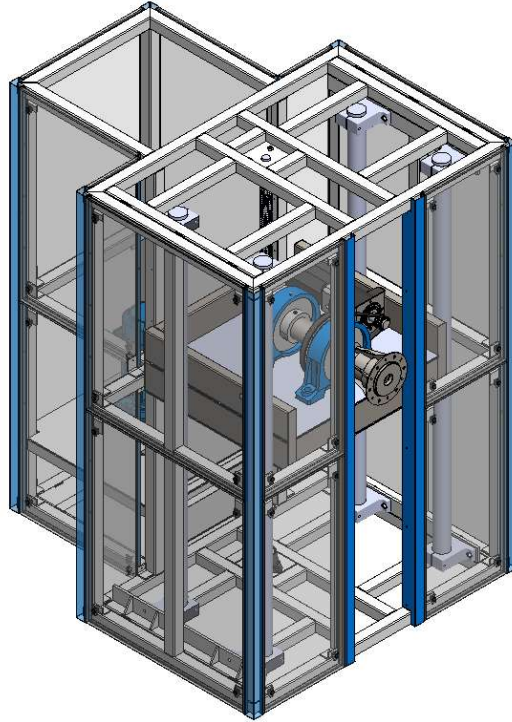


Figura 11 – Representação isométrica do mecanismo de rotação da mesa de trabalho

O sistema mecânico associado a esta funcionalidade é simples e construído com poucos componentes. Nessa lista de componentes encontram-se os seguintes: veio motriz principal, veio motriz secundário, veio de apoio e tensionador da correia de transmissão. O veio motriz principal corresponde ao veio que se encontra diretamente ligado ao veio do motor elétrico, por meio de um acoplamento elástico. O veio secundário corresponde ao veio que suporta parte do esforço exercido pela mesa de trabalho e que é montado na plataforma de elevação que contem o motor elétrico. Com uma estrutura idêntica à do veio de apoio, que suporta o restante esforço produzido pela mesa de trabalho, o veio motriz secundário é constituído por um elemento adicional: a polia de transmissão de binário. Esta polia de transmissão, juntamente com a polia de transmissão presente no veio motriz principal, constitui o sistema de transmissão responsável por multiplicar o binário

produzido pelo motor elétrico e transferi-lo para o veio que está conectado à mesa de trabalho. Desta forma, torna-se possível utilizar um servomotor compacto e de baixa potência para movimentar todo o sistema. As vantagens resultantes desta decisão traduzem-se numa torre de elevação mais pequena, num esforço menor suportado pelo fuso de elevação da mesa de trabalho e num custo de aquisição menor, uma vez que se trata de um motor com características mais comuns. Mais uma vez, escolheu-se um sistema de transmissão de correia devido às vantagens apresentadas no capítulo do estudo do estado da arte.

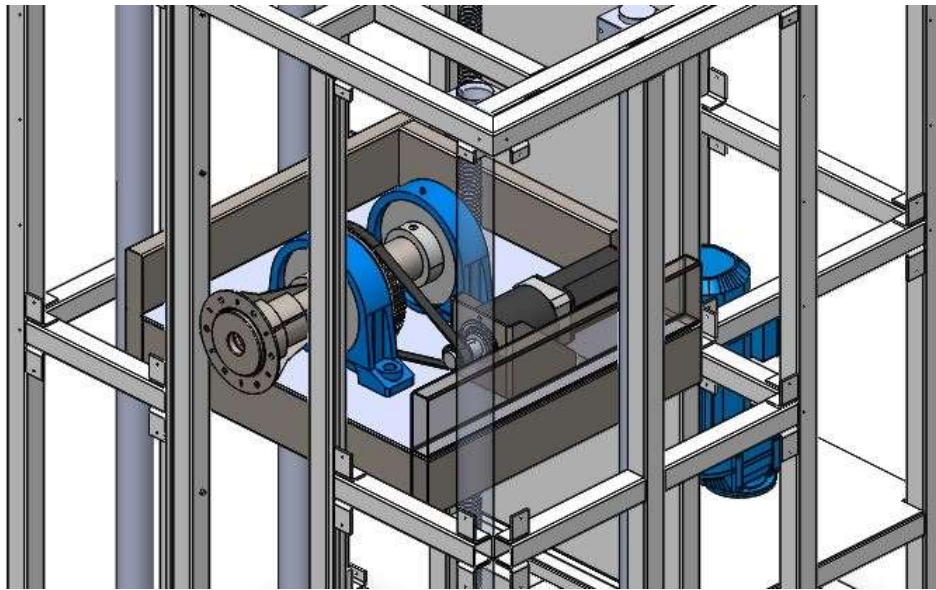


Figura 12 - Detalhe do mecanismo de rotação da mesa de trabalho

O veio de apoio, que difere do veio motriz secundário por não ter uma polia, é responsável por apoiar a mesa de trabalho no lado oposto. Por esse motivo, o veio de apoio é montado na plataforma de elevação da torre que não possui o motor elétrico.

A validação de todo o sistema mecânico responsável pela rotação da mesa de trabalho passou por duas etapas diferentes. A primeira etapa serviu para verificar a resistência estrutural dos veios de apoio da mesa de trabalho e a segunda etapa serviu para garantir que o motor elétrico produz binário suficiente para movimentar a mesa de trabalho de acordo com os parâmetros definidos.

A verificação da resistência estrutural dos veios de apoio foi executada com recurso ao módulo de cálculo estrutural do Solidworks. Antes de serem iniciadas as simulações, foram

estabelecidos os critérios necessários para o modelo tridimensional ser classificado como adequado para uso no projeto. Os dois critérios de sucesso abrangem a análise das tensões registadas no veio e as deformações causadas pela aplicação da carga.

Relativamente à matéria relacionada com a análise das tensões, foi estabelecido como objetivo o cumprimento de um critério de segurança igual ou superior a dois. No entanto, este critério de segurança não tem de ser cumprido enquanto o veio foi solicitado de acordo com a carga máxima admissível da mesa de trabalho. Esta premissa foi estabelecida durante a primeira análise estrutural, quando se verificou que um veio capaz de suportar a carga máxima admissível da mesa de trabalho exigia um estudo bastante aprofundado. Após a análise da massa das estruturas em estudo e dos respetivos meios de produção para o processo de soldadura manual, definiu-se 2860 kg como carga máxima admissível para o par de veios e ponderadas as consequências dessa decisão, decidiu-se avançar com o projeto nesse sentido para não correr o risco de incumprimento do planeamento geral.

A questão das deformações do veio de suporte também foi estudada por forma a perceber qual é o impacto negativo no desempenho da célula robotizada de soldadura. Dado que a mesa de trabalho se encontra apoiada nos veios, qualquer deformação registada na análise independente da mesa de trabalho será ampliada de acordo com a deformação registada na análise do veio. Assim sendo, foi definido que o limite máximo admissível para a deformação do veio é de 0,3 mm.

O design do veio de suporte da mesa de trabalho focou-se essencialmente na utilização de chumaceiras com tamanhos standard e medidas disponíveis com regularidade no mercado. Desta forma, o custo de aquisição das chumaceiras foi atenuado e o tempo de paragem para troca do componente, devido a uma avaria imprevista, também foi encurtado. O material escolhido para este componente foi o aço estrutural S355 devido às suas excelentes propriedades de resistência aos esforços. Tendo em mente esse objetivo, optou-se por desenhar o veio com uma forma cónica, fazendo uso de medidas mais pequenas na zona de apoio na plataforma e de medidas maiores na zona de contacto com a mesa de trabalho. Contudo, logo na primeira simulação foi observada uma grande concentração de tensões na zona de transição de diâmetro. Tal como é possível ver na figura 13, a concentração de

tensões foi responsável pela não aprovação do componente devido à falha de cumprimento do critério de segurança.

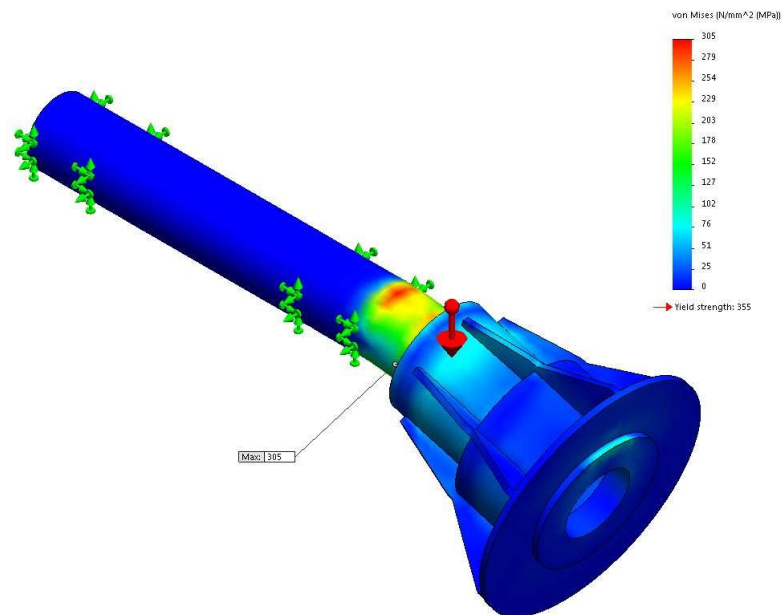


Figura 13 – Análise das tensões na estrutura do veio da primeira iteração

Para atenuar o efeito da concentração de tensões prolongaram-se as nervuras até à zona de diâmetro mais reduzido. Juntamente com essa melhoria, também foi alterada a medida do diâmetro do veio, na zona das chumaceiras, de 60 para 80 mm. Estas medidas revelaram-se eficazes e conduziram ao desenvolvimento de um par de componentes adequados ao uso neste projeto. Como se pode ver na figura 14, foi registada uma tensão máxima de 178 MPa, que corresponde a um coeficiente de segurança igual a 2 dado que a tensão de cedência do material seleccionado é de 355 MPa.

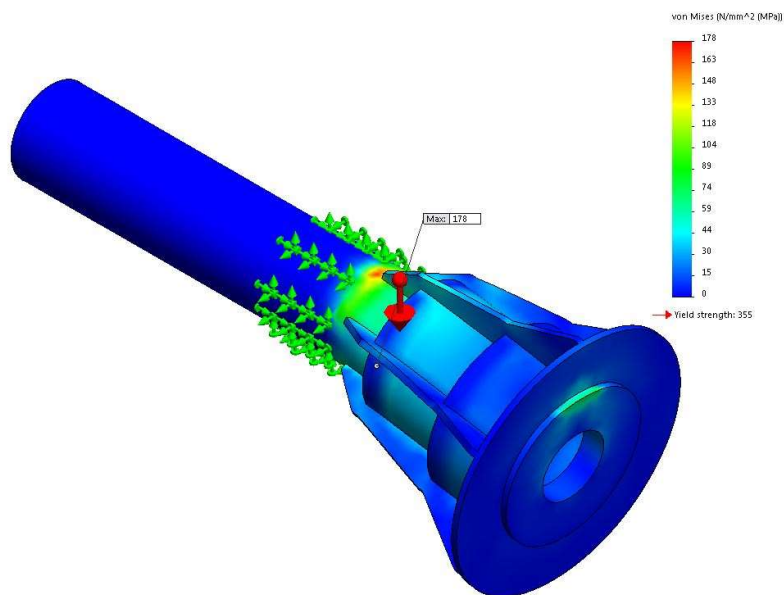


Figura 14 – Análise das tensões na estrutura do veio da segunda iteração

Em termos de deformações registadas sob esforço, não foi detetado qualquer entrave dado que o valor máximo observado foi de 0.2 mm.

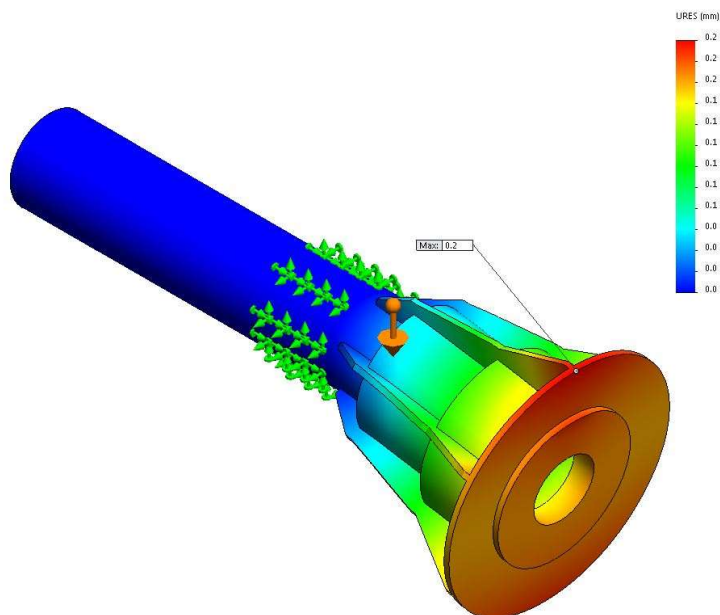


Figura 15 – Análise das deformações na estrutura do veio da segunda iteração

O processo de desenvolvimento do veio terminou assim que foram cumpridos todos os critérios de sucesso definidos no início.

Após a análise estrutural dos veios de suporte, procedeu-se à escolha e dimensionamento do motor elétrico responsável por girar a mesa de trabalho. O primeiro passo do procedimento de dimensionamento foi estabelecer um perfil de velocidade para o movimento de rotação. Isto é, definiu-se o tempo necessário para o sistema mecânico partir do repouso e acelerar até à velocidade definida e o tempo necessário para o sistema desacelerar desde essa velocidade até zero novamente. Optou-se por um perfil de velocidade trapezoidal, apresentado na figura 16 onde o tempo de aceleração é igual ao tempo de desaceleração.



Figura 16 – Perfil de velocidade do servomotor do eixo rotativo externo

Apesar de ser conhecido o tempo necessário para executar uma rotação completa da mesa de trabalho, o valor correspondente à velocidade em regime permanente não pode ser determinado através de uma relação direta, visto que é necessário ter em conta a influencia dos períodos de aceleração e desaceleração. Assim sendo, a velocidade linear da mesa de trabalho durante o movimento de rotação em regime permanente foi calculada sabendo que:

$$DL = 2 * \pi * r$$

Equação 15 – Cálculo da distância linear equivalente a uma rotação da mesa de trabalho

Sendo que:

$$DL = \text{dist\~{a}ncia linear percorrida durante uma volta}$$

$$r = \text{raio da circunferencia descrita pela rota\~{c}o da mesa de trabalho}$$

Portanto:

$$DL = 2 * \pi * 1,275$$

$$DL = 8.011 \text{ m}$$

Aplicando o valor da dist\~{a}ncia linear percorrida durante uma volta no c\~{a}lculo do perfil de velocidade temos que:

$$DL = \frac{1}{2} * v_{reg_{perm}} * t_{acel} + v_{reg_{perm}} * (t_{total} - 2 * t_{acel}) + \frac{1}{2} * v_{re_{perm}} * t_{acel}$$

$$8.011 = \frac{1}{2} * v_{re_{perm}} * 4 + v_{reg_{perm}} * (12 - 2 * 4) + \frac{1}{2} * v_{reg_{perm}} * 4$$

$$v_{reg_{perm}} = 1.001 \text{ m/s}$$

Equa\~{c}o 16 – C\~{a}lculo da velocidade linear em regime permanente

A acelera\~{c}o imposta ao movimento foi determinada segundo a seguinte express\~{a}o:

$$a = \frac{v_{re_{perm}}}{t_{acel}}$$

$$a = \frac{1.001}{4}$$

$$a = 0,250 \text{ m/s}^2$$

Equa\~{c}o 17 – C\~{a}lculo da acelera\~{c}o em regime permanente

A velocidade angular da mesa de trabalho, necess\~{a}rio para an\~{a}lise das curvas caracter\xedsticas do motor, foi calculada segundo a seguinte express\~{a}o:

$$v_{reg_{perm}} = \omega * r$$

$$\omega = \frac{v_{reg\_perm}}{r}$$

$$\omega = \frac{1.001}{1,275}$$

$$\omega = 0,7851 \text{ rad/s}$$

Equação 18 – Cálculo da velocidade angular em regime permanente

Convertendo para rotações por minuto:

$$N = \frac{60 * 0,7851}{2\pi}$$

$$N = 7,5 \text{ RPM}$$

Equação 19 – Conversão da velocidade angular para rotações por minuto

Uma vez conhecidas as características de funcionamento do sistema mecânico, procedeu-se ao cálculo da potência total necessária para executar o movimento e posterior cálculo do binário requerido.

$$P_{total} = P_{acel\ motor} + P_{acel\ massa} + P_{estática}$$

$$P_{total} = J_{motor} * \alpha_{motor} * \omega_{motor} + \frac{J_{massa} * \alpha_{massa} * \omega_{massa}}{\eta} + \frac{T_{massa} * \omega_{massa}}{\eta}$$

Equação 20 – Cálculo da potência total teórica requerida pelo eixo rotativo externo

O binário exercido sobre a massa foi determinado segundo a expressão seguinte:

$$T = m * \mu * \frac{d}{2}$$

Equação 21 – Cálculo do binário requerido pela mesa de trabalho

Sendo que:

$$m = \text{massa da mesa de trabalho}$$

$\mu = \text{coeficiente de atrito nas chumaceiras dos veios}$

$d = \text{diâmetro das chumaceiras dos veios}$

Substituindo na equação 20, correspondente ao cálculo da potência total:

$$P_{total} = J_{motor} * \alpha_{mo} * \omega_{motor} + \frac{J_{massa} * \alpha_{massa} * \omega_{massa}}{\eta} + \frac{m * \mu * \frac{d}{2} * \omega_{massa}}{\eta}$$

De seguida, simplificaram os termos associados à aceleração angular através da seguinte relação matemática:

$$\alpha = \frac{\omega}{t_{acel}}$$

Equação 22 – Cálculo da aceleração angular da mesa de trabalho

Após a substituição na equação 20 resultou em:

$$P_{total} = J_{motor} * \frac{\omega_{motor}}{t_{acel}} * \omega_{motor} + \frac{J_{massa} * \frac{\omega_{massa}}{t_{acel}} * \omega_{massa}}{\eta} + \frac{m * \mu * \frac{d}{2} * \omega_{massa}}{\eta}$$

Dado que um dos objetivos deste projeto é minimizar o custo de aquisição de materiais, optou-se por verificar se o servomotor Fanuc  $\beta 12/3000$ , utilizado no eixo linear externo, poderia ser também aplicado neste sistema, funcionando a uma rotação nominal igual a 2000 rotações por minuto. Algumas características do motor são apresentadas na tabela seguinte.

Data sheet				
Parameter	Symbol	Value		Unit
Stall Torque (*)	Ts	7		Nm
		71		kgfcm
Stall Current (*)	Is	6		A (rms)
Rated Output (*)	Pr	1.2		kW
		1.6		HP
Rating Speed	Nr	2000		min <sup>-1</sup>
Maximum Speed	Nmax	3000		min <sup>-1</sup>
Maximum Torque (*)	Tmax	15		Nm
		153		kgfcm
Rotor Inertia	Jm	0.00117		kgm <sup>2</sup>
		0.0119		kgfcm <sup>2</sup>
Rotor Inertia (with Brake)	Jm	0.00124		kgm <sup>2</sup>
		0.0127		kgfcm <sup>2</sup>
Torque constant (*)	Kt	1.16		Nm/A (rms)
		11.8		kgfcm/A (rms)
Back EMF constant (1 phase) (*)	Ke	41		V (rms)/1000 min <sup>-1</sup>
		0.39		V (rms)sec/rad
Armature Resistance (1 phase) (*)	Ra	1.00		Ω
Mechanical time constant	tm	0.003		s
Thermal time constant	tt	20		min
Static friction	Tf	0.3		Nm
		3		kgfcm
Weight	w	7.4		kg
Weight (with Brake)	w	9.6		kg
Maximum Current of Servo Amp.	Imax	20		A (peak)

Figura 17 – Especificação técnica do servo motor Fanuc β12/3000

Substituindo todos os dados na equação 20:

$$P_{total} = 0,00117 * \frac{209,43}{4} * 209,43 + \frac{8824,7539 * \frac{0,7581}{4} * 0,7581}{0,9} + \frac{4000 * 0,01 * \frac{0,08}{2} * 0,7581}{0,9}$$

$$P_{total} = 1423 \text{ W}$$

Uma vez conhecida a potência total do sistema mecânico e as velocidades de rotação de cada componente, tornou-se possível calcular o binário necessário para realizar o movimento. O cálculo do binário foi efetuado através da seguinte expressão:

$$P = T * \omega$$

Equação 23 – Cálculo do binário real requerido pela mesa de trabalho

Sendo que:

$P = \text{pot\^encia do sistema mec\^anico}$

$T = \text{bin\^ario requerido pelo sistema mec\^anico}$

$\omega = \text{velocidade angular do componente}$

Substituindo os dados relativos ao servomotor na equa\c3o\~ao 23:

$$1423 = T * 209,433$$

$$T = \frac{1423}{209,433}$$

$$T = 6,794 \text{ N.m}$$

Pela an\~alise da curva caracter\xedstica do motor, apresentada na figura 18, podemos afirmar que o servomotor em quest\~ao cumpre os requisitos do eixo rotativo externo da c\^elula robotizada de soldadura.

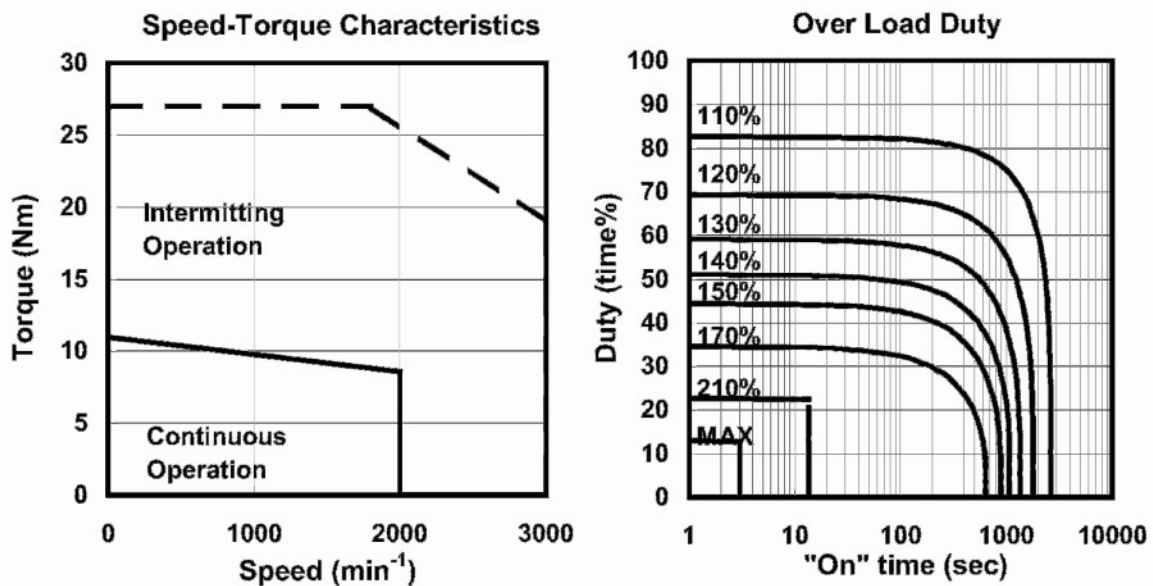


Figura 18 – Curva caracter\xedstica do servomotor do eixo rotativo externo

Atrav\xe9s dos c\~alculos efetuados e dos resultados obtidos tamb\xe9m se tornou poss\xedvel determinar a rela\c3o\~ao de transmiss\~ao te\~orica para o sistema de rota\c3o\~ao da mesa de trabalho.

$$N = \frac{\textit{Velocidade de rotação do motor}}{\textit{Velocidade de rotação da mesa}}$$

$$N = \frac{2000}{7,5}$$

$$N = 266,666$$

Equação 24 – Cálculo da relação de transmissão do sistema mecânico do eixo rotativo externo

#### 4.5.4 Mesa de Trabalho

A mesa de trabalho diz respeito à estrutura que une as duas torres de elevação descritas anteriormente. A sua função é servir de base de apoio aos gabaritos e outros meios auxiliares de produção.

Dada a sua função, a mesa de trabalho tem uma influência enorme na precisão associada à tarefa de soldadura. Uma deformação excessiva causada pelo peso dos meios de produção e das respectivas peças faz com que exista uma diferença entre o ambiente em simulador e o ambiente real, o que pode originar defeitos ou erros de fabrico. Um dimensionamento rigoroso não é executado apenas para garantir a precisão de trabalho, mas também para garantir a segurança da célula de trabalho. Uma vez que se trata de um componente que trabalha em suspensão, é necessário garantir a resistência estrutural do mesmo e definir os limites máximos admissíveis de peso. Considerando que a carga máxima da célula de soldadura deverá ser de 4000 kg, de acordo com os requisitos definidos no início do projeto, a carga máxima admissível na mesa de trabalho corresponde à diferença entre os 4000 kg e a massa da estrutura da mesa de trabalho. Deste modo, é necessário conceber uma mesa de trabalho otimizada a nível de peso para permitir que seja utilizada com mais peças além das que são consideradas neste projeto. Contudo, considera-se que a mesa de trabalho tem um comportamento positivo caso cumpra as exigências estruturais sob a ação de uma carga estimada de 1250 kg, correspondente ao gabarito e às peças usadas como estudo de caso desta Tese de Mestrado. Um outro aspecto a ter conta durante a fase de conceção da mesa de trabalho é a acessibilidade do manipulador robótico. De acordo com os requisitos técnicos do projeto, o robô deve ser capaz de aceder aos pontos de soldadura por ambos os lados da mesa de trabalho.

Uma vez que se trata de um componente que necessita de suportar cargas elevadas em situações extremas, o material selecionado para a sua construção é o aço ao carbono S355JR. Considerando que o limite elástico do material é de 355 MPa, a tensão provocada pela aplicação da carga máxima admissível não deve ultrapassar esse valor sob o risco de entrar em colapso. No entanto, uma estrutura nunca deve ser dimensionada no limite das capacidades do material, sendo sempre considerado um coeficiente de segurança ( $CS_{MT}$ ). O coeficiente de segurança de uma estrutura deste género pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$CS_{MT} = \frac{\textit{Tensão limite elástico}}{\textit{Tensão máxima registada}}$$

Equação 25 – Cálculo do coeficiente de segurança da mesa de trabalho

Para a validação do comportamento da mesa de trabalho irá ser considerado um coeficiente de segurança igual a 2. Desta forma, a tensão máxima registada na análise de elementos finitos, na situação de carga máxima admissível, não poderá ser superior a 177 MPa.

Em suma, para ser considerada apta para integrar a célula de soldadura deste projeto, a mesa de trabalho deve cumprir os seguintes requisitos:

- coeficiente de segurança maior ou igual a 2 para uma carga correspondente ao máximo admissível da mesa de trabalho;
- deformação menor ou igual a 2,5 mm para uma carga igual a 1250 kg;
- acessibilidade adequada ao robô por ambos os lados.

Tomando como ponto de partida os três requisitos anteriores, procedeu-se ao desenvolvimento do primeiro conceito da mesa de trabalho. Este primeiro conceito inspirou-se no funcionamento de uma coluna vertebral, concentrando grande parte da resistência estrutural no centro enquanto utiliza secções de material menores nas extremidades. Desta forma, tentou-se conceber uma mesa de trabalho com elevada acessibilidade devido à distância entre apoios transversais, com peso reduzido e com um comportamento estrutural positivo. Neste modelo foram utilizados perfis tubulares de secção quadrada, com 60 mm e 80 mm de aresta e 3 mm de espessura.

Após a elaboração do modelo tridimensional da mesa de trabalho em Solidworks, determinou-se que a sua massa é de 455 kg, fazendo com que a carga máxima admissível da mesa de trabalho seja aproximadamente de 3500 kg. Após a análise estrutural, segundo o método de elementos finitos, foi possível verificar que a mesa de trabalho não cumpre um dos requisitos funcionais previamente estabelecidos.

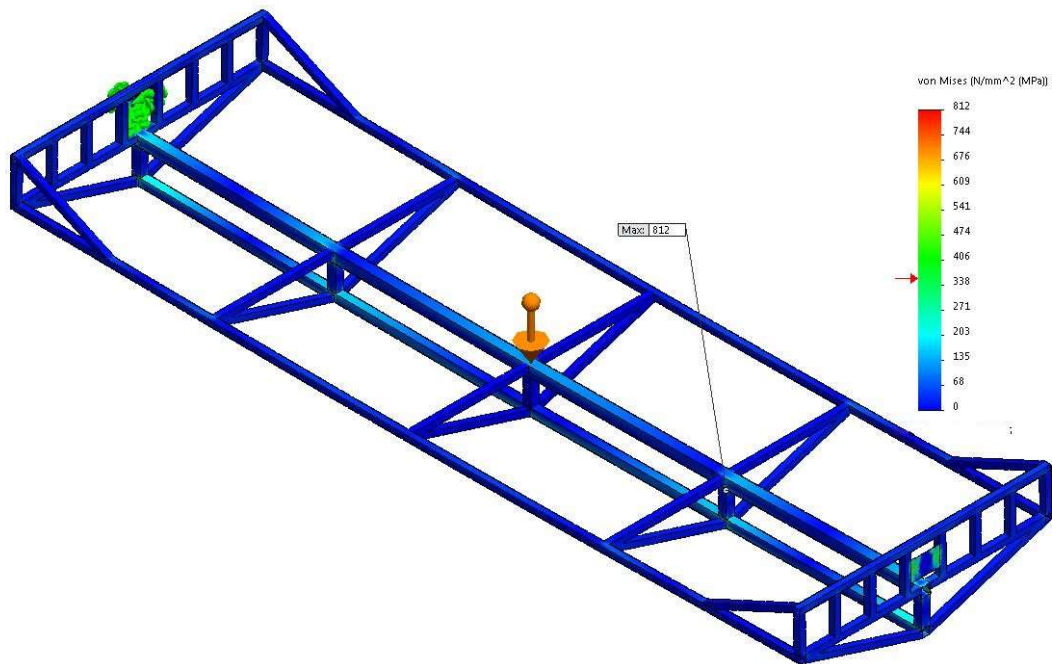


Figura 19 – Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da primeira iteração

Tal como é possível observar na imagem anterior, quando é sujeita a uma carga de 3500 kg a estrutura entra em colapso, uma vez que a tensão máxima registada (812 MPa) ultrapassa largamente a tensão de limite elástico do material. Na imagem seguinte é possível observar que o local onde foi registada a tensão máxima está situado numa união de dois perfis utilizados na construção da mesa. A concentração de tensões nestas zonas é frequente em configurações que não possuam elementos de transição de esforço com arestas suavizadas.

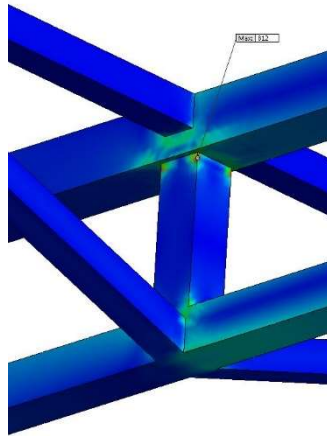


Figura 20 – Detalhe da concentração de tensões

Dado que o critério de resistência máxima não foi cumprido, a análise estrutural foi interrompida e procedeu-se ao melhoramento do conceito inicial. Para a segunda iteração da estrutura optou-se por manter a configuração baseada na coluna vertebral, adicionando mais um apoio transversal e aumentando as secções dos perfis tubulares para 80×80×3 mm, 100×100×3 mm e 100×100×4 mm. Consequentemente, a massa da mesa de trabalho aumentou para os 606 kg e a carga máxima admissível reduziu para os 3300 kg.

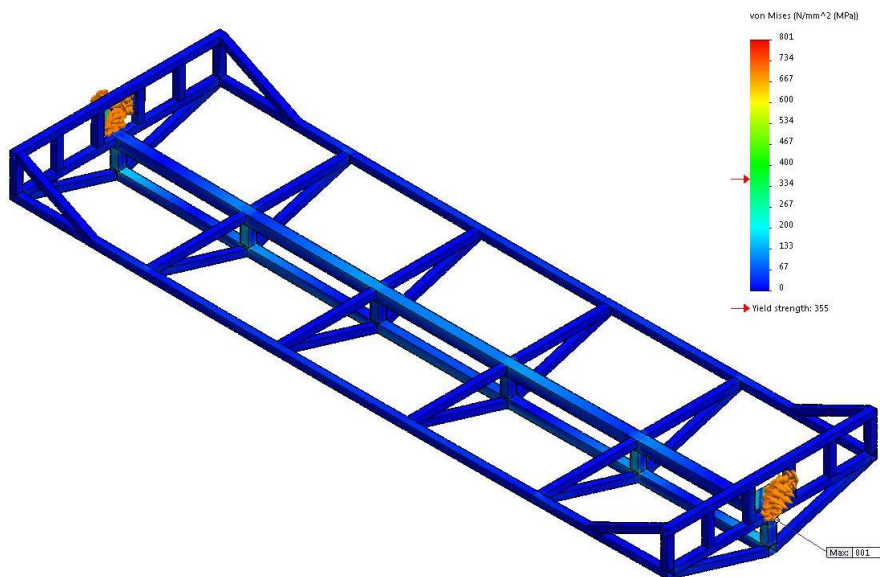


Figura 21 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da segunda iteração

Apesar das melhorias introduzidas neste novo conceito, o critério de resistência máxima não foi cumprido. A estrutura da mesa de trabalho quando sujeita a uma carga de 3300 kg registou uma tensão máxima de 801 MPa, correspondendo a uma melhoria na resistência estrutural pouco expressiva. Após a análise das tensões registadas, observou-se novamente que o local da rutura do material continuou a ser na união dos perfis e optou-se por abordar a estrutura da mesa de trabalho de forma diferente.

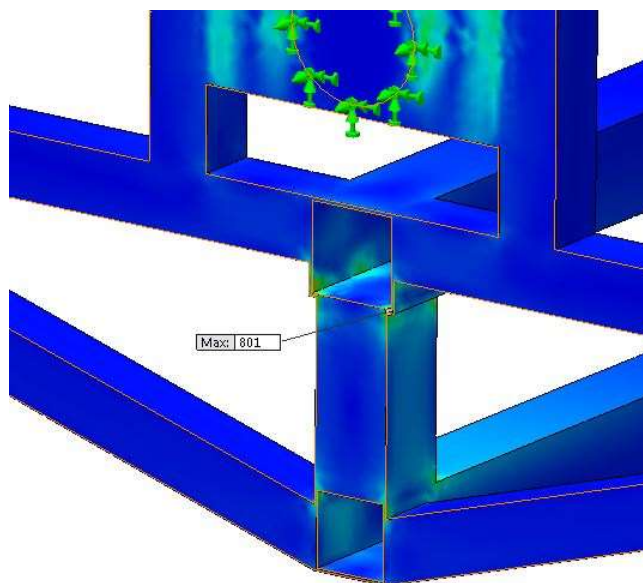


Figura 22 – Detalhe da concentração de tensões

Contrariamente aos conceitos anteriores, a estrutura desenvolvida para a terceira iteração baseou-se na distribuição uniforme da resistência estrutural do componente. Constituída por perfis tubulares de secção quadrada com 80 mm de aresta e 3 mm de espessura, e com 100 mm de aresta e 4 mm de espessura, a nova estrutura assemelha-se mais a uma plataforma de apoio e possui uma massa igual a 853 kg e conseqüentemente uma carga máxima admissível de 3100 kg.

Analisando os resultados da terceira simulação, foi possível observar uma melhoria notória no comportamento da mesa trabalho sob esforço. Comparativamente ao segundo conceito testado, a nova configuração da mesa de trabalho permitiu reduzir o valor da tensão máxima registada em aproximadamente 80%, sendo este último igual a 165 MPa. O novo

valor da tensão máxima registada também cumpre o critério estabelecido para o coeficiente de segurança, uma vez que é inferior a 177 MPa.

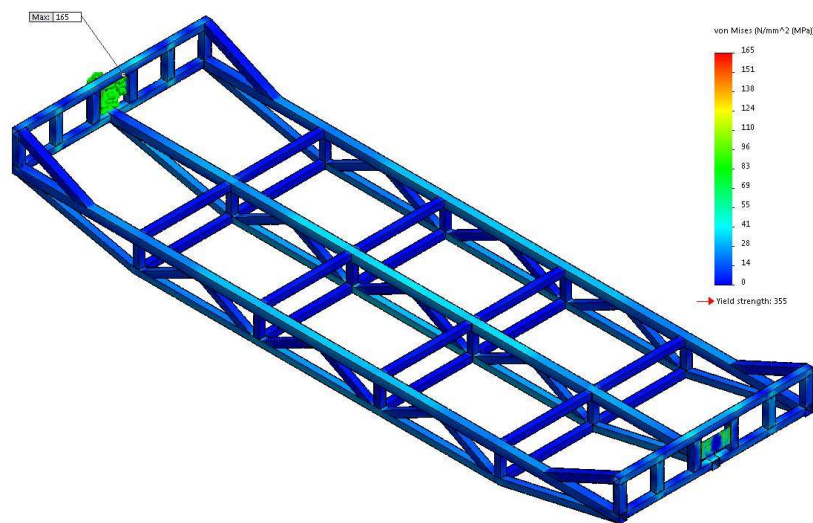


Figura 23 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da terceira iteração

Uma vez que os critérios de resistência estrutural foram cumpridos, a simulação focou-se na análise das deformações da estrutura sob uma carga de 1250 kg. Tal como a imagem seguinte indica, a deformação máxima registada é de 3,1 mm. Apesar de se tratar de uma diferença mínima em relação ao valor pré-estabelecido para este parâmetro, o resultado é considerado negativo. Assim sendo, o ciclo iterativo continuou e foi desenvolvida uma nova mesa de trabalho com a mesma configuração. Contudo, os perfis escolhidos para comporem a nova mesa de trabalho foram os perfis estruturais IPE, uma vez que apresentam um momento de inércia maior em relação aos perfis retangulares e consequentemente uma deformação menor para a mesma carga aplicada. Constituído na grande maioria por perfis estruturais IPE120, o quarto conceito da mesa de trabalho apresentou uma massa de 1049 kg e uma carga máxima admissível de 2950 kg.

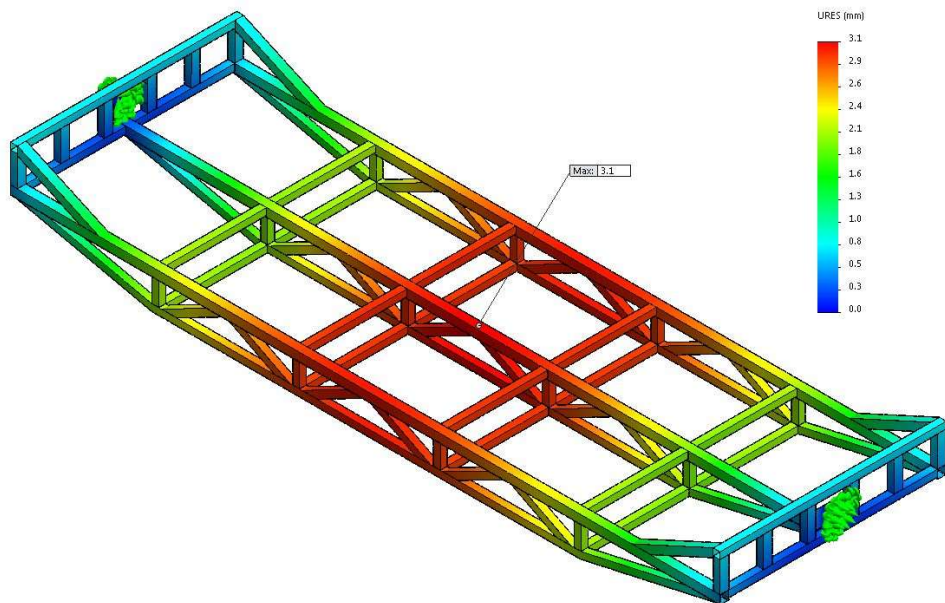


Figura 24 - Análise das deformações na estrutura da mesa de trabalho da terceira iteração

Contrariamente ao que era esperado, os resultados da nova simulação não apresentaram uma melhoria na resistência estrutural. Aliás, o comportamento da estrutura sob o esforço aplicado por uma carga de 2950 kg piorou e foi registada uma tensão máxima de 197 MPa. Desta forma, esta iteração foi considerada inválida por não cumprir o critério do coeficiente de segurança mínimo.

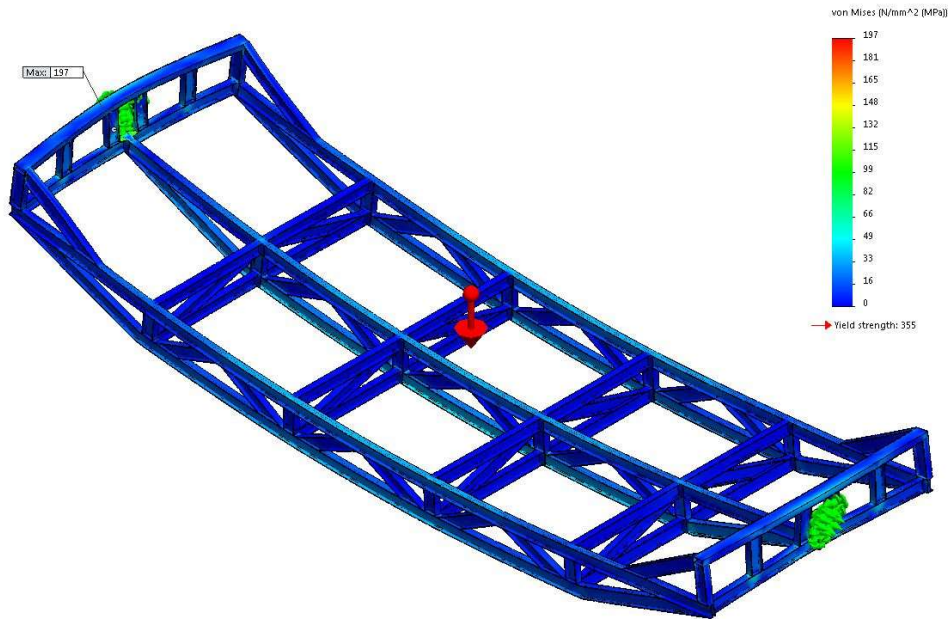


Figura 25 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da quarta iteração

No entanto, de modo a entender a razão pela qual este conceito, que deveria ser mais resistente, teve um desempenho mais fraco, foi realizado um estudo mais aprofundado sobre a distribuição das tensões e das deformações na estrutura. Os perfis estruturais IPE possuem uma elevada resistência à flexão, mas essa propriedade apenas se manifesta num dos sentidos de aplicação do esforço.

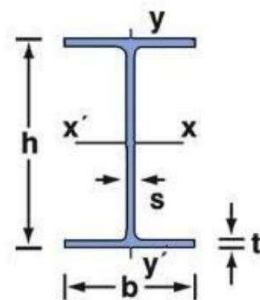


Figura 26 – Representação da secção de um perfil estrutural IPE

O perfil IPE120, representado na imagem anterior e usado na construção do último conceito analisado, possui um momento de inércia de  $317,8 \text{ cm}^4$  segundo o eixo horizontal e um momento de inércia de  $27,67 \text{ cm}^4$  segundo o eixo vertical. A título de exemplo, o

perfil quadrado  $100 \times 100 \times 4$  mm, utilizado no penúltimo conceito, possui um momento de inércia de  $236,34 \text{ cm}^4$  em ambos os eixos.

O momento de inércia segundo um dado eixo é diretamente proporcional à tensão e à deformação registada no momento de aplicação de uma dada carga. Portanto, pode-se afirmar que o perfil IPE apenas é apropriado para resistir a esforços perpendiculares ao plano horizontal, enquanto o perfil quadrado é mais versátil e resiste a esforços nas duas direções. Todavia, a versatilidade do perfil quadrado acaba por ser prejudicial dado a sua resistência à aplicação de uma carga vertical ser significativamente menor em relação à resistência apresentada pelo perfil IPE. A nível de massas por metro linear, a utilização do perfil IPE120 revela-se mais uma vez vantajosa dado que este pesa  $10,4 \text{ kg/m}$  e o perfil quadrado  $100 \times 100 \times 4$  mm pesa  $11,98 \text{ kg/m}$ .

Pela análise feita, pode-se concluir que uma mesa de trabalho constituída apenas por perfis estruturais IPE não é a solução mais eficaz e o mesmo se verifica para uma mesa de trabalho composta apenas por perfis quadrados. Tendo em conta os momentos de inércia associados a cada uma das secções estudadas, a solução mais eficaz, e capaz de se apresentar como solução para o problema, terá de ser composta tanto por perfis IPE como por perfis quadrados. A utilização combinada dos dois perfis nos locais corretos permitirá desenvolver uma solução mais resistente e sem aumentos de peso significativos.

Neste ponto do projeto, pode-se caracterizar o conceito existente como três treliças dispostas paralelamente ao eixo longitudinal da estrutura e ligadas entre si, em intervalos iguais, por meio de uma outra estrutura que forma um anel (ver Figura 27). Nas extremidades existe um outro anel responsável por criar uma base de fixação ao veio de rotação. Este último anel é formado maioritariamente por perfis dispostos na vertical. Para criar a solução ideal cruzou-se a caracterização anterior e a informação apresentada sobre os momentos de inércia dos vários perfis para selecionar, de forma correta, o perfil a utilizar em cada localização. Como resultado do cruzamento de informação, surgiu um novo conceito que utiliza perfis IPE 140 nas treliças longitudinais e perfis quadrados  $100 \times 100 \times 3$  mm nos anéis transversais e nos anéis de ligação ao veio de rotação.

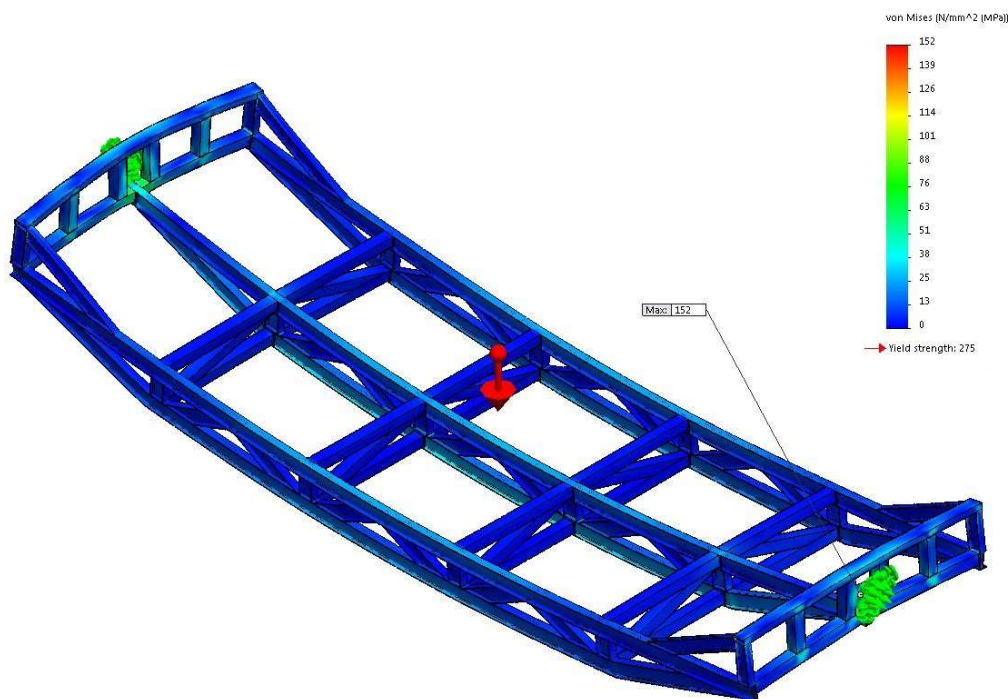


Figura 27 - Análise das tensões na estrutura da mesa de trabalho da quinta iteração

Em consequência da alteração dos perfis utilizados na estrutura, o conceito desenvolvido possui uma massa de 1133 kg, o que representa um aumento de 8% face ao conceito anterior. Este aumento de massa é justificado pela substituição dos perfis IPE por perfis quadrados nos anéis de ligação das treliças longitudinais, tal como foi descrito durante a análise das secções dos dois perfis. Uma vez que a massa em vazio aumentou, a carga máxima admissível da mesa de trabalho diminuiu, passando a ter um valor próximo de 2860 kg.

Tal como esperado, o comportamento da nova estrutura, sob o efeito de uma carga igual ao valor da carga máxima admissível, foi substancialmente melhor. A redução de 23% na tensão máxima registada, para 152 MPa, permitiu que esta cumprisse o critério correspondente ao coeficiente de segurança e que fosse feita uma análise às deformações provocadas pela carga correspondente às peças utilizadas como estudo de caso.

Tal como é apresentado na figura 28, a análise das deformações teve um resultado positivo. O valor da deformação máxima registada foi de 2,5 mm, situando-se no limite superior do

critério estabelecido, mas considerado válido. Por fim, o espaçamento de 1430 mm e 1500 mm entre os anéis transversais da estrutura e o afastamento de 1170 mm entre as treliças longitudinais permitem que o robô aceda sem problemas a grande parte do espaço de trabalho, o que torna o critério de acessibilidade válido.

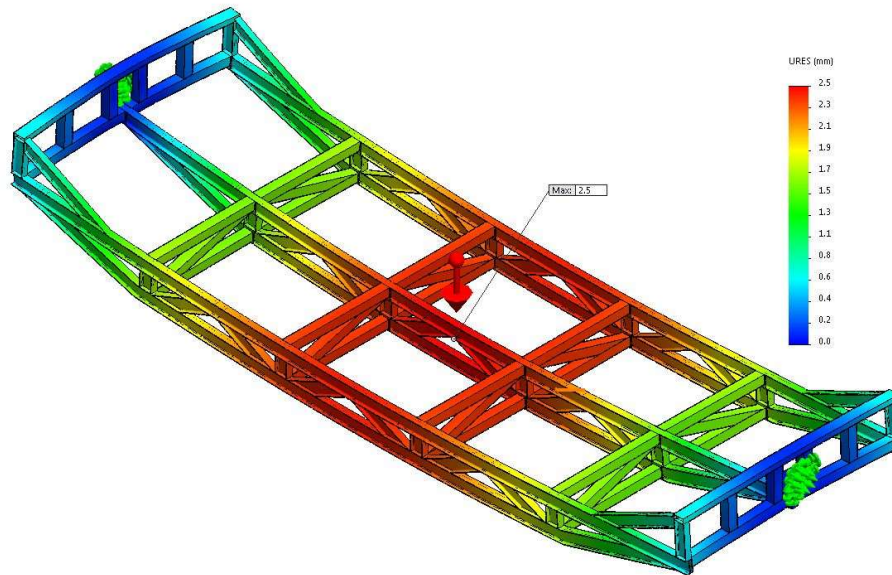


Figura 28 - Análise das deformações na estrutura da mesa de trabalho da quinta iteração

Com o cumprimento dos três requisitos definidos para a mesa de trabalho, o ciclo iterativo de desenvolvimento e respetiva simulação de comportamento fica concluído e a estrutura final fica definida. Ao longo das iterações foi possível diminuir a tensão máxima registada cerca de 81% e diminuir a deformação máxima registada durante o uso dos componentes utilizados como estudo de caso cerca de 86%. Em contrapartida, a massa em vazio da mesa de trabalho aumentou 2,5 vezes e a carga máxima admissível diminuiu cerca de 18%. As características finais da mesa de trabalho são apresentadas, de forma resumida, na tabela seguinte.

Tabela 6 – Características gerais da mesa de trabalho

<b>Características gerais da mesa de trabalho</b>	
Massa em vazio (kg)	1133
Carga máxima admissível (kg)	2860
Tensão máxima registada (MPa) *	152
Deformação máxima registada (mm) *	4,3
Tensão máxima registada (MPa) **	90
Deformação máxima registada (mm) **	2,5
* - Sob efeito da carga máxima admissível	
** - Sob efeito da carga correspondente à utilização das peças de estudo de caso	

A terceira e última etapa diz respeito à elaboração dos desenhos para fabrico. Apesar de não apresentar nenhum desafio a nível da criatividade para a equipa de engenharia, a elaboração dos desenhos de fabrico tem uma importância extrema no sucesso do projeto. Os desenhos de fabrico devem conter toda a informação necessária para fabricar o componente e para proceder ao controlo de qualidade do mesmo.

#### **4.6. PROJETO ELÉTRICO**

O projeto elétrico da célula robotizada de soldadura teve início ainda durante a fase de projeto mecânico. Durante a primeira fase do projeto foram selecionados alguns componentes cruciais para prosseguir com o desenvolvimento da componente mecânica, mas não foram abordados temas relativos à integração desses mesmos componentes no controlador do manipulador robótico, à segurança do operador e à alimentação e controlo do mecanismo de elevação da mesa de trabalho.

#### 4.6.1 Projeto elétrico da célula

A segurança do ser humano é a prioridade número um de qualquer projeto industrial. Desta forma, torna-se necessário prever todas as situações de perigo e encontrar soluções para evitar a sua ocorrência ou para minimizar os danos causados caso se concretizem. Inerente à segurança do ser humano encontra-se a proteção do material através do posicionamento adequado no espaço e da limitação das condições de uso.

Assim sendo, foi levado a cabo um estudo da planta da célula de fabrico para assegurar que o local determinado para efetuar as operações de movimentação da mesa de trabalho e de início do programa do robô não representa um potencial perigo para o trabalhador. Também foi estudado o posicionamento das várias botoneiras de emergência para garantir que, em qualquer momento e em qualquer ponto da célula, o trabalhador consegue acionar o estado de emergência do equipamento e eliminar o perigo existente.

Tal como é possível ver na figura 29, a célula de soldadura possui uma configuração retangular e é delimitada por uma vedação com 2,5 m de altura ao longo do seu perímetro.

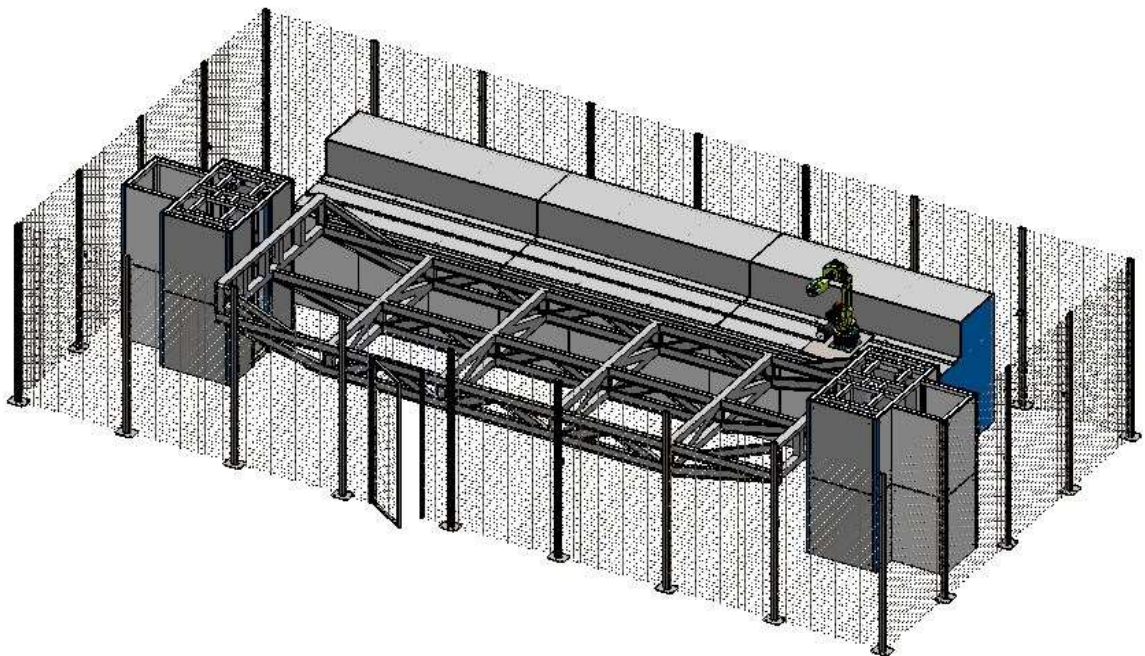


Figura 29 – Representação da célula robotizada de soldadura

O único ponto de acesso ao interior do espaço de trabalho é fornecido por uma porta com 690 mm de largura e 2078 mm de altura, situada no lado de maior comprimento da vedação oposto ao eixo linear externo. A existência de um único ponto de acesso permitiu prever, com facilidade, todos os comportamentos que o operador poderá ter ao longo da sequência de tarefas para colocar a célula em operação. Com a exceção da tarefa de carga e descarga da mesa de trabalho, todas as tarefas executadas pelo operador devem ocorrer fora do espaço de trabalho do robô e com uma linha de visão direta para este. Por essa mesma razão, optou-se por colocar o posto de comando do lado exterior da vedação, junto à porta de acesso, uma vez que não foi encontrada qualquer vantagem em posicioná-lo afastado desta.

O posicionamento do posto de comando fora da célula obriga que o operador saia do espaço de trabalho do robô para o manobrar. Contudo, também foi necessário prever o posicionamento de sensores capazes de ler o estado da porta de acesso (aberta ou fechada) e capazes de detetar a presença do operador no posto de comando. A validação de duas condições de segurança (porta fechada e operador presente no posto de comando) é extremamente importante para dificultar um acionamento por erro humano ou por falha/defeito de um dos sensores. O sensor selecionado para ler o estado da porta foi um sensor indutivo e o sensor selecionado para detetar a presença do operador no posto de comando foi um fim de curso mecânico acionado por um pedal.

Todas as medidas de segurança descritas até este ponto foram consideradas como medidas preventivas. Todavia, caso essas medidas falhem não existem medidas nem componentes capazes de tomar uma ação de segurança de forma corretiva. Como tal, decidiu-se implementar uma cadeia de botoneiras de emergência, no interior da vedação para permitir que um operador encurralado acione o estado de emergência e cesse a situação iminente de perigo.

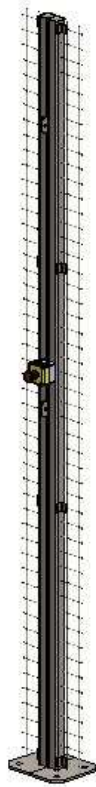


Figura 30 – Representação da botoneira de emergência

A preservação do material elétrico e a limitação das condições de uso também contribuem significativamente para a segurança global da célula robotizada de soldadura. Para proteger todo o sistema elétrico, a alimentação principal da célula é protegida através de um interruptor seccionador e de um interruptor diferencial. Estes dois componentes permitem isolar os circuitos de potência e de comando da célula dos restantes circuitos da fábrica e cortar a alimentação em situações de perigo. Após o interruptor diferencial foram colocados dois disjuntores para separar os circuitos do controlador dos circuitos do mecanismo de elevação da mesa de trabalho

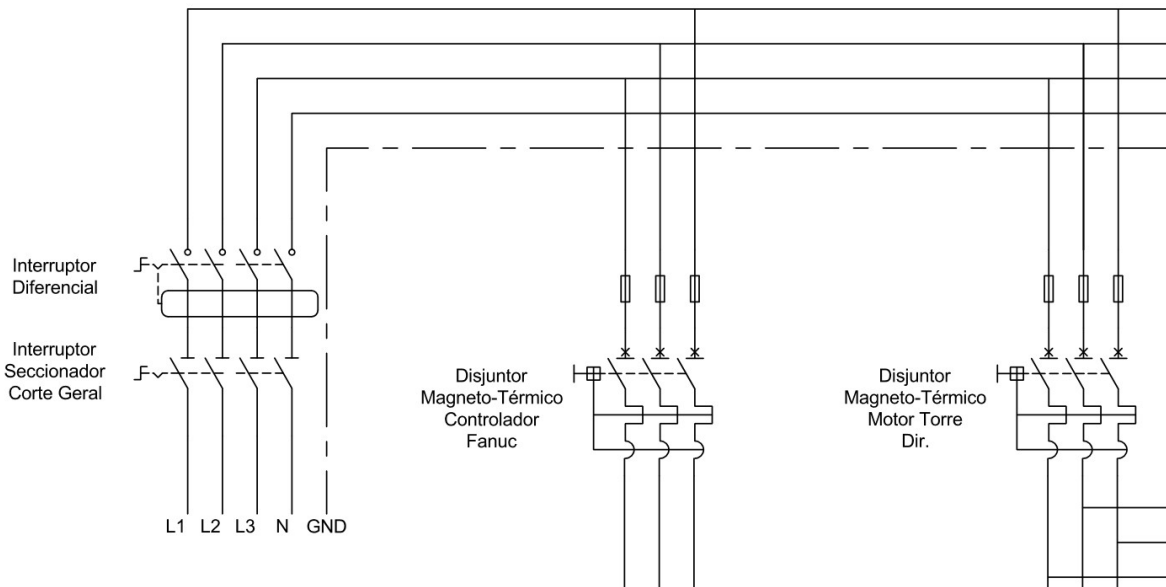


Figura 31 – Representação do disjuntores magneto-térmicos

A integração de todos os componentes relativos à segurança e proteção será analisada de forma individual nas secções seguintes.

#### 4.6.2 Integração controlador Fanuc RJ3-iB

O controlador Fanuc RJ3-*iB*, que integra o conjunto robótico utilizado neste projeto, é o componente responsável por coordenar os movimentos do manipulador de acordo com as instruções dadas pelo programador. Todavia, este incorpora outras funcionalidades, que em conjunto com a sua capacidade de processamento, permitem descartar a utilização de um autómato para realizar tarefas de monitorização de comandos de emergência ou leitura de sensores externos. Por esse motivo, decidiu-se integrar o controlador Fanuc como cérebro principal da célula robotizada de soldadura e beneficiar das vantagens derivadas dessa decisão: centralização do comando, simplificação do projeto e poupança de investimento.

Uma das principais tarefas atribuídas ao controlador, além do controlo do movimento do robô, foi a de supervisionar todas as botoneiras de emergência e o sensor da porta de acesso ao interior da célula. Estes dois componentes de segurança resultam em acções de controlo diferentes, apesar de terem o mesmo objetivo: garantir a segurança do operador.

As botoneiras de emergência, dispostas em toda a periferia interior da célula, foram ligadas em série através dos seus contactos normalmente fechados. O circuito foi então fechado nos terminais ENGIN1 e ENGIN2, conforme indicado na figura 32.



Figura 32 – Representação do circuito de emergência do controlador Fanuc

O acionamento de uma das botoneiras interrompe o circuito fechado e ativa o estado de emergência do controlador, originando uma paragem imediata de todos os eixos, da elevação da mesa de trabalho e do aparelho de soldar. O processo de fabrico só poderá retomado assim que as botoneiras forem todas desativadas. Além de ser ativado por este método, o estado de emergência também pode derivar do acionamento do botão de emergência da consola, do *deadman switch* do operador e dos fins de curso do eixo externo de translação do manipulador.

A porta de acesso à zona de trabalho do robô também foi considerada como um elemento de monitorização constante e de extrema importância. Tal como foi descrito no subcapítulo anterior, foi instalado um sensor na vedação da célula para determinar o estado da porta de acesso. O sensor aplicado foi um sensor indutivo, que permite uma montagem expedita e simples, com um contacto normalmente aberto. Este sensor não foi incluído no circuito de emergência, do qual fazem parte as botoneiras referidas anteriormente, uma vez que o controlador Fanuc possui dois terminais próprios para o sensor da zona de acesso: FENCE1 e FENCE2. Tal como está descrito na figura 33, cada terminal do contacto normalmente aberto do sensor é ligado a um dos terminais FENCE do controlador.

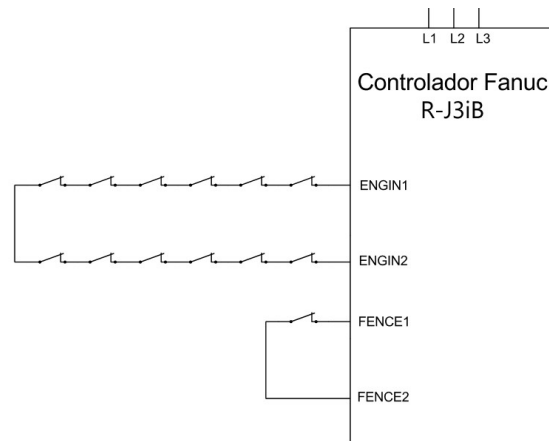


Figura 33 – Representação do circuito *Fence* do controlador Fanuc

Assim que o circuito é fechado, o estado de emergência da célula robotizada é acionado e surge uma mensagem de aviso na consola. Na prática, o resultado do acionamento do estado de emergência através das botoneiras ou através do sensor da porta é igual. Todavia, a mensagem de erro apresentada ao operador é diferente, sendo essa a razão apontada pelo fabricante para separar os dois circuitos.

Durante a análise do layout da célula de fabrico, foi considerada a existência de um interruptor accionado por um pedal no exterior da célula, junto ao controlador do manipulador robótico. Sendo o objetivo deste componente elétrico validar a presença do operador junto ao controlador, o pedal foi ligado ao terminal DI5 (*digital input 5*) da carta de entradas e saídas digitais do controlador. Deste modo, é possível implementar a funcionalidade de segurança durante a programação da tarefa de soldadura. Ou seja, é dado ao programador a opção de implementar uma pausa no início do programa enquanto o sinal no DI5 for igual a zero. Assim sendo, o operador é obrigado a sair do espaço de trabalho da célula para pressionar o pedal e dar continuidade ao processo.

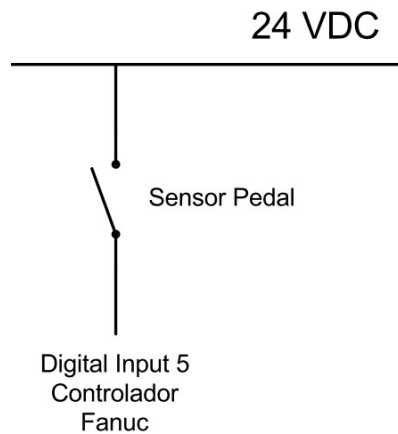


Figura 34 – Representação do circuito do pedal do operador

Além do pedal do posto de comando da célula, também foram ligados aos terminais DI3 e DI4 do controlador Fanuc dois sensores indutivos. Estes dois sensores têm como objetivo monitorizar as extremidades do eixo linear externo. Dado que o controlador não possui terminais de ligação exclusivos para esta funcionalidade, optou-se por utilizar os terminais da carta de entradas e saídas digital. Da mesma forma que é dado ao programador a possibilidade de validar a presença do operador, também é dada a possibilidade de interromper qualquer movimento dentro do espaço de trabalho caso os sensores sejam atuados. Previne-se desta forma a existência de acidentes derivados do descarrilamento da plataforma de transporte do robô nas extremidades da estrutura do eixo externo.

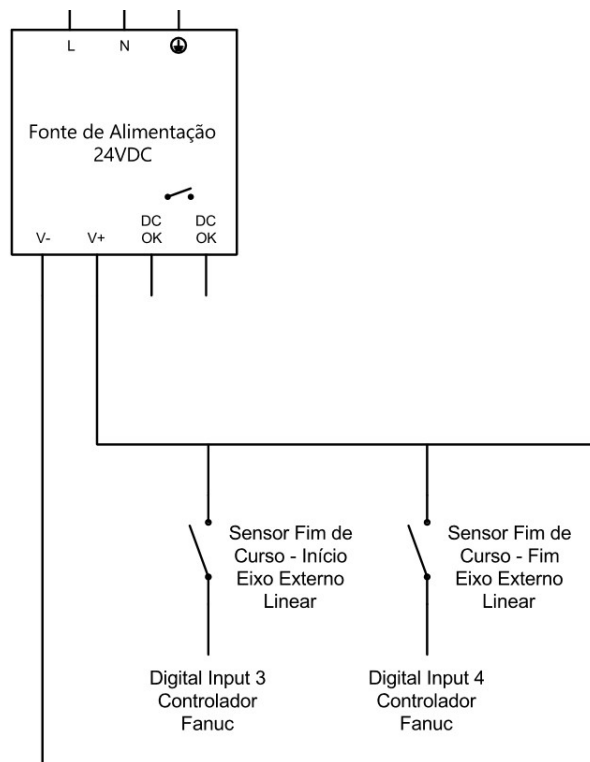


Figura 35 – Representação do circuito dos sensores de fim de curso do eixo linear externo

### 4.6.3 Mecanismo de elevação da mesa de trabalho

O mecanismo de elevação da mesa de trabalho não está interligado, de forma direta, com o controlador Fanuc RJ-3iB, pertencente do robô utilizado ao longo desta tese de mestrado. Isto significa que os circuitos de potência e de comando são independentes do controlador e é impossível exercer controlo sobre os mesmos através da programação do robô. Por esse motivo, foi necessário projetar um circuito de potência, capaz de alimentar e proteger os motores elétricos, um circuito de comando, para o operador poder subir e descer a mesa de trabalho em segurança, e um circuito capaz de transmitir ao controlador a informação sobre a posição da mesa.

O circuito de potência, que tem como funções alimentar e proteger os motores elétricos, é constituído por um disjuntor magneto-térmico ligado ao disjuntor principal da célula, por dois contactores e por uma proteção com recurso a fusíveis. Com a utilização destes três componentes foi possível alcançar as proteções necessárias e a funcionalidade de inversão do sentido de rotação do motor, essencial para o movimento de subida e descida da mesa de trabalho. O disjuntor magneto-térmico é um dispositivo capaz de fornecer proteção

diferencial, proteção magnética e proteção térmica ao componente em que se encontra conectado. Este dispositivo elétrico além de isolar o circuito de elevação da mesa de trabalho dos restantes circuito elétricos, também permite que, em situações extremas, seja feito o corte da alimentação ao motor mesmo que este esteja sob carga ou sob um curto-circuito. Adicionalmente, por uma questão de redundância, foram adicionados três fusíveis (um em cada fase) de 10 A, antes do disjuntor, para reforçar a proteção térmica dos motores. Os dois contactores aplicados formam um par contactor-contactor inversor, cujo objetivo é alternar o sentido de rotação do motor elétrico, por meio da troca das fases de alimentação. Os dois dispositivos também fornecem uma proteção por meio de um encravamento mecânico, que impede que os dois contactores sejam operados ao mesmo tempo. Desta forma, foi possível evitar que fossem fornecidos ao motor, dois sinais de comando contraditórios durante o mesmo espaço de tempo.

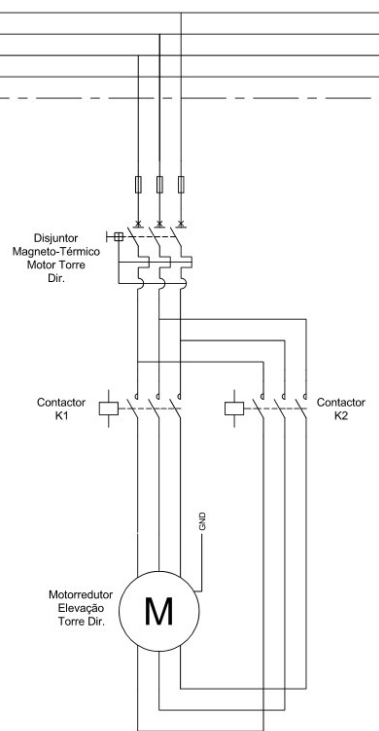


Figura 36 – Representação do circuito de potência dos motores de elevação da mesa de trabalho

O circuito de comando do mecanismo de elevação da mesa é responsável por operar os dois contactores do circuito de potência, conforme o sinal fornecido pelo operador, caso as condições de segurança estejam reunidas. As condições de segurança consideradas ao longo do projeto elétrico foram as seguintes:

- Limitação do movimento de subida
- Limitação do movimento de descida
- Proteção contra sinais de controlo contraditórios

A limitação dos movimentos de subida e de descida é extremamente importante para assegurar a integridade das torres de elevação. Sem estas proteções, o fuso de elevação poderia rodar infinitamente até a fêmea da plataforma sair da rosca do fuso de esferas ou até a mesa de trabalho embater no solo. Na primeira situação corria-se o risco de causar danos extensos ao mecanismo de elevação da mesa de trabalho, além de colocar em perigo a vida do operador da célula de soldadura. Na segunda situação existia o risco de danificar a mesa de trabalho através do impacto no solo e o risco de danificar todo o circuito elétrico, através da sobrecarga de corrente elétrica após a mesa de trabalho entrar em contacto com o chão. Assim sendo, optou-se por instalar dois sensores indutivos, nas extremidades do fuso de elevação de uma das torres, para funcionarem como sensores de fim de curso.

A proteção contra ordens de comando contraditórias, através do circuito de comando, foi implementada como uma redundância, dado que o par contactor-contactor inversor já possui um encravamento mecânico para esse propósito. Contudo, atendendo ao custo de implementação e ao acréscimo de segurança que essa funcionalidade apresenta, optou-se por incluí-la no projeto da célula robotizada de soldadura. Para minimizar o custo total de implementação, a proteção contra os sinais de comando contraditórios foi concretizada com recurso a um relé com dois contactos (um normalmente aberto e um normalmente fechado) para operar o contactor dos motores elétricos.

A interligação de todos os componentes referidos, juntamente com as botoneiras sem encravamento, está representada na figura 37. Tomando como exemplo o circuito de elevação, o contacto normalmente aberto da botoneira foi ligado ao contacto normalmente fechado do sensor indutivo, colocado no topo da torre, e posteriormente ligado ao contacto normalmente fechado do relé que ordena o movimento de descida. Por fim, o contacto normalmente fechado do relé do movimento de descida foi ligado à bobina que comanda o relé do movimento de elevação. No contacto normalmente aberto deste último relé foi aplicada uma tensão de 24 V, que é conduzida para a bobina do contactor do motor quando

o relé for comutado. Ao conectar, em série, o contacto normalmente fechado do relé que comanda o movimento oposto foi assegurada a condição de não permitir a existência de duas ordens de comando distintas, uma vez que o circuito fica interrompido. O circuito de comando para o movimento de descida da mesa foi concebido de forma semelhante ao circuito de elevação.

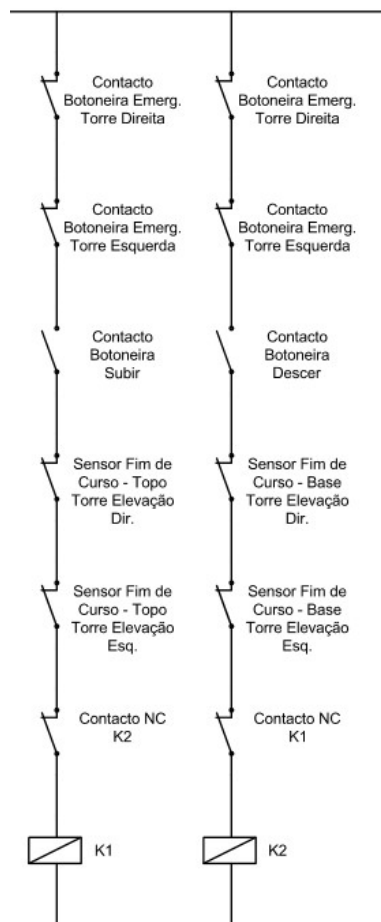


Figura 37 – Representação do circuito de comando dos motores de elevação da mesa de trabalho

Por fim, para dar a conhecer ao controlador do robô a posição da mesa de trabalho, foi projetado um terceiro circuito. Este é constituído apenas pelos sensores indutivos, que atuam como fins de curso e comunicam pelo terminal de entradas e saídas digitais do controlador Fanuc RJ-3iB. Os objetivos definidos para este circuito foram os seguintes:

- Colocar um sinal digital positivo no DI1 (*digital input 1*) do robô caso a mesa de trabalho esteja na posição de trabalho

- Colocar um sinal digital positivo no DI2 (*digital input 2*) do robô caso a mesa de trabalho esteja na posição de carga e descarga

Tal como está representado na figura 38, o contacto normalmente aberto do sensor indutivo, localizado no topo da torre de elevação, foi ligado ao DI4 do controlador Fanuc e o contacto normalmente aberto do sensor indutivo, localizado na base da torre de elevação, foi ligado ao DI5. Estes dois sinais podem ser utilizados pelo programador do robô para garantir que a operação de soldadura só é iniciada quando a mesa está na posição correta.

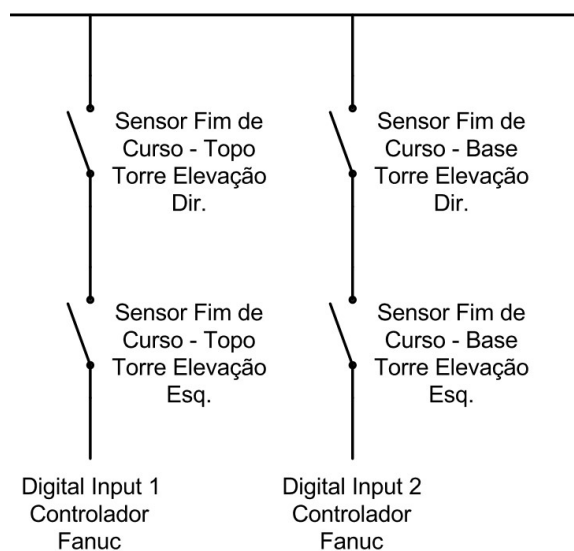


Figura 38 – Representação do circuito dos sensores de fim de curso do mecanismo de elevação da mesa de trabalho

#### 4.7. PROGRAMAÇÃO

Assim que a estrutura do sistema mecânico e elétrico foi definida, avançou-se para a programação da operação da célula robotizada. Esta fase, que foi extremamente importante para o processo de desenvolvimento, permitiu validar os conceitos que delinearam a configuração da célula e obter a primeira informação relacionada com a produtividade.

Uma vez que o manipulador robótico é da marca Fanuc e pretendeu-se executar a programação em modo offline, optou-se por usar o software da mesma marca: Fanuc Roboguide.

O primeiro conceito a ser validado foi a acessibilidade do robô a todos os pontos de soldadura. Para tal, modelou-se a célula robotizada no espaço de trabalho do software Roboguide de acordo com o projeto e definiram-se as coordenadas de todos os pontos de interesse no primeiro quadrante da mesa de trabalho. Atendendo ao facto das peças em análise, bem como a mesa de trabalho, serem simétricas no plano vertical e horizontal, optou-se por validar a capacidade da célula em executar a operação proposta com base na análise de apenas um quadrante da área de trabalho (Castro, Silva, & Silva, 2017).

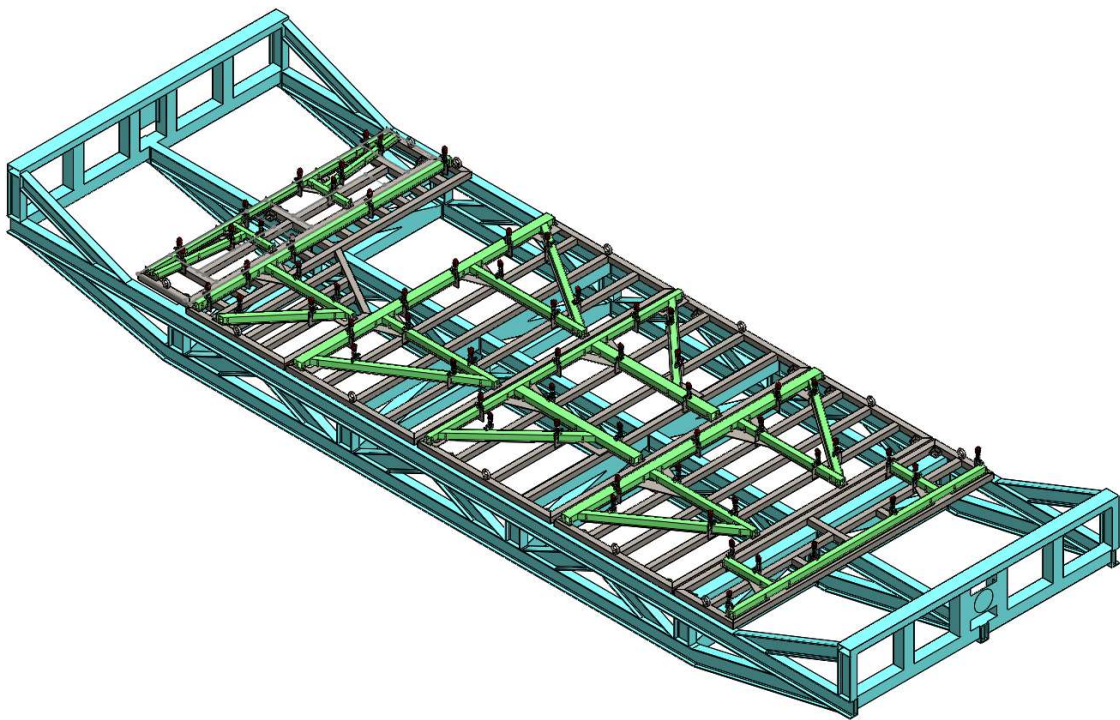


Figura 39 – Representação das peças em análise e respetivos meios auxiliares de fabrico

Uma vez confirmada a capacidade de o robô alcançar todos os pontos, seguiu-se o planeamento das trajetórias e das velocidades de aproximação. Nesta fase foram tomadas decisões extremamente importantes para os resultados finais inerentes à produtividade da célula. De forma a manter um compromisso entre a segurança do equipamento e a produtividade, definiu-se que o manipulador robótico apenas se moverá à sua velocidade máxima enquanto se mantiver a uma distância mínima de 150mm das peças na mesa de trabalho e reduzirá a sua velocidade para uma velocidade de aproximação, equivalente a 20% da velocidade máxima, quando se encontrar a uma distância mínima inferior aquela que foi mencionada anteriormente. Desta forma, tornou-se possível baixar o tempo de

ciclo para a produção de grandes estruturas que façam o uso de toda a área da mesa de trabalho.

A forma como o robô realiza a sua aproximação ao ponto de soldadura também foi tida em conta e foi estabelecida uma regra para uniformizar a programação. Considerou-se que o robô deve posicionar-se a uma distância mínima de 50mm da peça de trabalho após a execução do cordão de soldadura. Também foi definido que o robô deve realizar todas as aproximações e afastamentos numa direção perpendicular ao plano horizontal da mesa de trabalho. Estas duas regras estabelecidas para a programação das operações de soldadura visam principalmente a segurança e a integridade da célula. Uma vez que as peças de trabalho são fixas aos meios auxiliares de produção através de grampos, adequados para trabalhos de soldadura, tornou-se crucial definir regras que reduzissem substancialmente a probabilidade de existirem colisões.

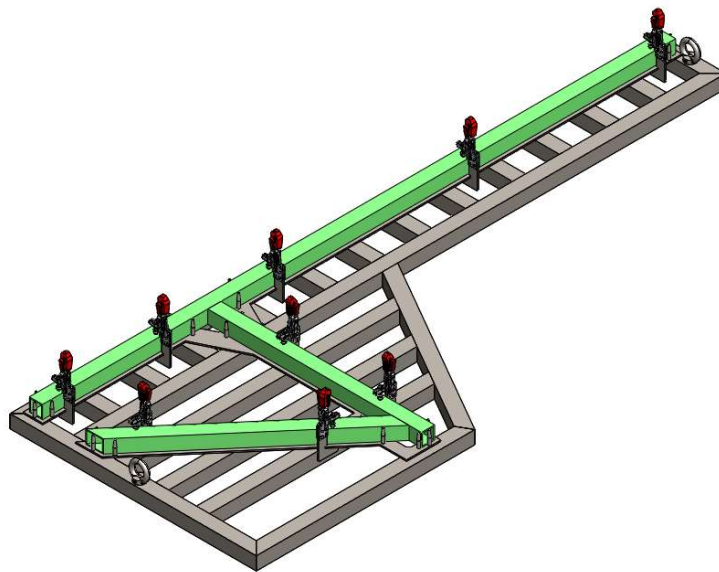


Figura 40 – Detalhe de uma das peças em análise e respetivo meio auxiliar de fabrico

Antes de proceder para a simulação da operação de soldadura, foi definida mais uma regra para padronizar a programação de todas as operações da célula. Com o intuito de acelerar as tarefas de programação de futuros trabalhos através do reaproveitamento de funções, optou-se por estruturar todas as operações em duas rotinas. A primeira rotina tem o objetivo de avaliar as condições de segurança da célula através da análise dos sinais

lógicos apresentados na secção anterior e a segunda rotina tem o objetivo de levar a cabo a operação de soldadura.

Após a definição dos padrões de programação e utilização da célula robotizada de soldadura, procedeu-se à simulação do fabrico das peças consideradas nesta dissertação. Mais uma vez, atendendo ao facto de as peças serem simétricas em relação ao plano vertical e ao plano horizontal, optou-se por realizar uma primeira simulação apenas no primeiro quadrante da mesa de trabalho. O resultado final foi extrapolado através da multiplicação do tempo de ciclo obtido por um fator de 4. O resultado obtido nesta simulação foi de 4 minutos e 15 segundos, o que equivale, aproximadamente, a um tempo de ciclo total de 17 minutos (Castro et al., 2017).

#### **4.8.    PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDADURA**

A parametrização do processo de soldadura tem um forte impacto na produtividade da célula robotizada, uma vez que o tempo de ciclo de uma peça ou de um conjunto de peças está diretamente relacionado com o tipo de fio usado para material de adição. Assim, ao escolher um diâmetro de fio com 1.6mm permitimos que o aparelho de soldadura tenha uma taxa de deposição de material superior em relação a um fio com 0.8mm de diâmetro, que se reflete na mesma proporção na velocidade de soldadura do robô. Contudo, as taxas de deposição de material são limitadas pelas gamas de operação dos aparelhos de soldadura, uma vez que para atingir valores elevados é necessário disponibilizar valores elevados de corrente elétrica. Deste modo, o material de adição a utilizar nesta célula robotizada de soldadura foi escolhido com base no aparelho de soldadura já existente no sistema produtivo.

O material de adição escolhido para este projeto foi o OK Aristorod 12.50 da ESAB (ver anexo 3) indicado para utilização em aplicações robotizadas na indústria automóvel e naval. Algumas características deste material também contribuíram para a decisão, tais como a estabilidade do arco em gamas de corrente elétrica elevadas, a redução de salpicos do material de adição e a possibilidade de permitir grandes velocidades de alimentação do fio. As propriedades mecânicas do material de adição também se revelam adequadas para utilização, dado que a tensão do limite elástico é de 448 MPa e a tensão de rotura do material é de 538MPa.

Desta forma, os parâmetros de soldadura para este projeto foram selecionados em função das recomendações do fornecedor do material de adição e encontram-se descrito na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de soldadura

Parâmetros de soldadura	
Tipo de material de adição	G3Si1
Gás de proteção	100% CO2
Diâmetro do fio	1,2 mm
Velocidade de alimentação do fio	2,8 m/min
Taxa de deposição do material de adição	1,5 kg/h
Intensidade de corrente elétrica	150 A
Diferença de potencial	17,8 V

#### 4.9. ORÇAMENTAÇÃO

A orçamento do projeto descrito ao longo desta dissertação foi executada com o intuito de permitir a elaboração de um estudo de rentabilidade. Assim sendo, foram realizadas diversas consultas a várias empresas portuguesas, que atuam na área de fabrico de máquinas industriais e componentes para máquinas industriais, com o objetivo de determinar o investimento necessário para concretizar a implementação do projeto. De modo a recolher dados comparáveis, a informação transmitida aos diversos potenciais fornecedores foi sempre igual e encontra-se descrita ao longo dos desenhos técnicos e da lista de peças. Além do fabrico dos componentes personalizados, foram tomadas em conta outras atividades relevantes, a cargo dos potenciais fornecedores, tais como a aquisição e montagem de componentes *standard*, a aquisição e montagem de componentes elétricos, a instalação dos equipamentos no local de operação e a formação de um grupo de 4

operadores. Uma vez que o robô já era propriedade da empresa, os valores apresentados não incluem qualquer investimento relacionado com este ou com o software de programação que o acompanha. Seguindo uma prática padrão da indústria, também foram excluídos quaisquer custos relacionados com o transporte dos equipamentos até ao local de operação.

Uma vez que a célula é constituída por um conjunto de estruturas que foram analisadas de forma independente, o orçamento é apresentado na tabela 8 seguindo a mesma lógica. Os valores apresentados refletem a melhor opção entre todos os potenciais fornecedores, considerando um equilíbrio entre custo e prazo de execução.

Tabela 8 – Resumo do orçamento para o fabrico da célula robotizada de soldadura

Eixo Linear Externo	15041,25 €
Eixo Rotativo Externo + Elevação Mesa de Trabalho	18784,50 €
Mesa de Trabalho	10395,00 €
Gabaritos de Soldadura	6022,60 €
Vedação da Célula Robotizada	5175,00 €
Programação da Célula Robotizada	3500,00 €
Total	58917,75 €
Prazo de execução (fabrico, instalação e ensaios)	180 dias

Através da análise do orçamento apresentado, podemos afirmar que o montante total necessário para concretizar o projeto da célula robotizada de soldadura é de 58917,75 €.

#### **4.10. ESTUDO DE RENTABILIDADE**

O objetivo de qualquer investimento realizado por uma empresa é aumentar o lucro gerado pelas atividades realizadas ao longo do ano. No caso da indústria, pretende-se que o

investimento tenha um impacto direto na redução ou eliminação dos recursos necessários para realizar uma certa atividade. Neste caso, o investimento visa reduzir o tempo necessário para concluir o processo de fabrico de um conjunto de peças e aumentar a capacidade do sistema produtivo. Portanto, a análise preliminar sobre a rentabilidade do investimento é feita com base nos custos diretos do processo de fabrico.

O primeiro passo para realizar a análise preliminar é determinar o custo de uma hora de trabalho do soldador e do robô. De modo a simplificar a análise, iremos considerar que o custo de é de 25€/h, que é igual para ambos e que já inclui a amortização dos investimentos de aquisição e das horas de trabalho alocadas à programação do robô. Os dados recolhidos na fase da programação da célula robotizada permitem avançar para o segundo passo, que é determinar em forma de percentagem a redução do tempo de fabrico.

$$\Delta t_{rel} = \frac{\text{tempo de fabrico robotizado}}{\text{tempo de fabrico manual}} \times 100$$

$$\Delta t_{rel} = \frac{17}{35} \times 100$$

$$\Delta t_{rel} = \frac{\text{tempo de fabrico robotizado}}{\text{tempo de fabrico manual}} \times 100$$

$$\Delta t_{rel} = 48,5 \%$$

Equação 26 – Cálculo da redução do tempo de fabrico

Considerando o resultado da equação 26, verifica-se que a robotização do processo de fabrico permite reduzir o tempo de fabrico em 51,5 %. O valor absoluto em euros é calculado da seguinte forma:

$$\Delta t_{abs} = \left( \frac{\text{tempo de fabrico manual}}{60} \times \text{custo/hora} \right) \times (1 - \Delta t_{rel})$$

$$\Delta t_{abs} = \left( \frac{35}{60} \times 25 \right) \times (1 - 0,485)$$

$$\Delta t_{abs} = 7,51 \text{ €}$$

Equação 27 – Cálculo da redução do custo de fabrico

Por fim, resta determinar o número de unidades que deverão ser produzidas para recuperar o investimento efetuado, considerando que a célula não será usada para outra atividade.

$$N = \frac{\text{Valor total do investimento}}{\Delta t_{abs}}$$

$$N = \frac{58917,75}{7,51}$$

$$N = 7856$$

Equação 28 – Cálculo do número de unidades necessária para atingir a amortização do investimento

Conclui-se então que será necessário produzir 7856 autocarros, visto que o conjunto de peças selecionado para estudo de caso corresponde apenas a um veículo, para recuperar o investimento. Considerando que a produção anual do conjunto de peças em questão não ultrapassa as 300 unidades, determina-se que a execução do projeto não é rentável de acordo com uma perspetiva teórica de produtividade constante sem otimizações ao longo do tempo de vida do produto. Todavia, a rentabilidade de um projeto desta natureza não pode ser medida somente através da redução do custo de fabrico das peças em questão. A implementação de uma célula robotizada tem diversos benefícios que representam mais géneros de retorno económico para a empresa. O primeiro género de retorno económico que pode ser considerado incide sobre o nível de aproveitamento dos materiais. Ou seja, existe um retorno económico direto que resulta da redução das peças não conformes e do aumento da qualidade do sistema produtivo. Este género de retorno económico, apesar de ser abstrato na fase de implementação do projeto, é facilmente mensurável após os primeiros meses de operação. No entanto, os outros tipos de retorno económico que se podem considerar no âmbito deste projeto não são fáceis de quantificar a curto prazo, mesmo em fase de operação, como aquele que foi descrito anteriormente. Esses retornos económicos resultam desde a redução do número de acidentes de trabalho até à receita gerada pelas atividades que apenas se tornam possíveis após a implementação de uma

célula robotizada na linha de produção. Essas atividades representam os negócios que apenas se tornam possíveis quando a empresa atinge um determinado patamar de capacidade produtiva. Isto é, diversos clientes das várias indústrias selecionam os seus fornecedores com base num conjunto alargado de critérios e não apenas no preço final da peça. Dentro desse conjunto, normalmente, estão incluídos critérios referentes às tecnologias possuídas e dominadas pelo fornecedor.

Desta forma, é possível afirmar que a rentabilidade da implementação de uma célula robotizada de soldadura é uma métrica bastante complicada de quantificar e que o peso da redução do custo de fabrico no global é bastante reduzido para sustentar uma decisão. A robotização de um processo de fabrico torna-se assim numa estratégia de crescimento e inovação a longo prazo e não numa medida para melhorar o retorno económico resultante da venda de um produto.



## 5. CONCLUSÃO

Os resultados observados ao longo desta dissertação permitem afirmar que é possível implementar processos de fabrico robotizados na indústria automóvel, mais concretamente na área de veículos especiais e personalizados. O trabalho desenvolvido também permite afirmar que é possível transformar as fábricas de forma sustentável, reaproveitando equipamento antigo e fora de serviço, se for envolvida uma equipa com as competências necessárias para levar a cabo o desafio proposto.

Apesar do aumento de produtividade observado neste projeto não ser suficiente para amortizar o investimento financeiro necessário, tornou-se evidente que o ganho obtido é significativo. Em contexto de aplicação real, a célula robotizada de soldadura iria servir outros produtos e outras linhas de produção, o que iria conduzir a uma aceleração do retorno económico. O trabalho relacionado com a análise e simulação do processo produtivo também influenciou bastante os resultados obtidos e considera-se que um dos trabalhos futuros deste projeto será aprimorar a metodologia usada. Uma vez que a relação com a empresa envolvida nesta dissertação cessou, o acesso ao software de simulação e a dados estatísticos de produção foi condicionado e impediu a continuação do trabalho desenvolvido até à altura.

Não obstante as condicionantes referidas, uma parte dos resultados desta dissertação foram apresentados na 27<sup>th</sup> *Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (FAIM 2017) sob o formato de artigo científico e comunicação oral.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro, André F, Silva, MF, & Silva, FJG. (2017). Designing a robotic welding cell for bus body frame using a sustainable way. *Procedia Manufacturing*, 11, 207-214.

Prescrições uniformes aplicáveis à homologação de veículos de passageiros de grande capacidade no que se refere à resistência da superestrutura, 66 C.F.R. (2011).

Disposições uniformes relativas à homologação de veículos de categorias M2 ou M3 no que respeita às suas características gerais de construção, 2015/922 C.F.R. (2015).

Cupek, Rafal, Ziebinski, Adam, Huczala, Lukasz, & Erdogan, Huseyin. (2016). Agent-based manufacturing execution systems for short-series production scheduling. *Computers in Industry*, 82, 245-258.

da Silva, Ezio Fernandes, Scotti, Américo, Jr, José Rubens Macedo, & de Oliveira, José Carlos. (2011). Análise do processo de soldagem MIG/MAG sob o enfoque da qualidade da energia elétrica.

School bus rollover protection, 220 C.F.R. (1977).

Gauchia, A, Diaz, V, Boada, MJL, & Boada, BL. (2010). Torsional stiffness and weight optimization of a real bus structure. *International Journal of Automotive Technology*, 11(1), 41-47.

- Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*: John Wiley & Sons.
- Gruver, William A, Soroka, Barry I, Craig, John J, & Turner, Timothy L. (1984). Industrial robot programming languages: a comparative evaluation. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*(4), 565-570.
- Gürsel, K Turgut, & GÜRSESLİ, Serap. (2010). Analysis of the Superstructure of a Designed Bus in Accordance with Regulations ECE R 66. *Gazi University Journal of Science*, 23(1), 71-80.
- Lapapong, Sittikorn, Pitaksapsin, Narong, Sucharitpwatkul, Sedthawatt, Tantanawat, Tanakorn, Naewngerndee, Rattanasuda, & Phuchamnong, Anek. (2013). *Stress Analysis and Validation of Superstructure of 15-meter Long Bus under Normal Operation* (0148-7191). Retrieved from
- Liang, C-C, & Le, G-N. (2010). Analysis of bus rollover protection under legislated standards using LS-DYNA software simulation techniques. *International Journal of Automotive Technology*, 11(4), 495-506.
- Nof, Shimon Y. (2009). *Springer handbook of automation*: Springer Science & Business Media.
- Pan, Zengxi, Polden, Joseph, Larkin, Nathan, Van Duin, Stephen, & Norrish, John. (2010). *Recent progress on programming methods for industrial robots*. Paper presented at the Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK).
- Rowe, Richard, & Jeffus, Larry. (2008). *Manual de soldadura gmaw (MIG-MAG)*: Editorial Paraninfo.
- Vatanabe, Sandro L, Lippi, Tiago N, de Lima, Cícero R, Paulino, Glaucio H, & Silva, Emílio CN. (2016). Topology optimization with manufacturing constraints: a unified projection-based approach. *Advances in Engineering Software*, 100, 97-112.
- Weman, Klas. (2011). *Welding processes handbook*: Elsevier.

## 7. ANEXOS



## Anexo 1 – Dimensões gerais da célula robotizada de soldadura

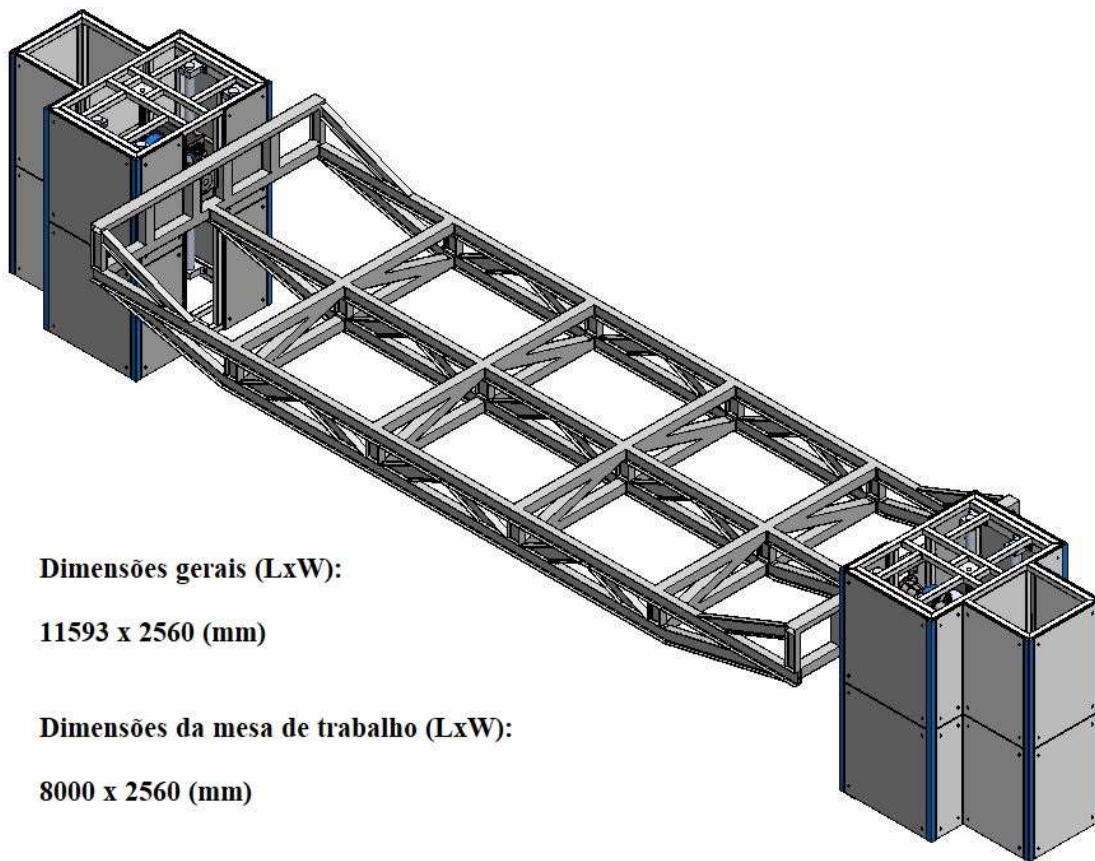


**Dimensões gerais (LxWxH):**

**12482 x 6280 x 2510 (mm)**



## Anexo 2 – Dimensões gerais do mecanismo de elevação e rotação da mesa de trabalho



**Dimensões gerais (LxW):**

**11593 x 2560 (mm)**

**Dimensões da mesa de trabalho (LxW):**

**8000 x 2560 (mm)**



## Anexo 3 – Ficha técnica do material de adição usado na soldadura

### OK Aristorod 12.50

OK Aristorod 12.50 is a bare Mn-Si alloyed G3Si1/ER70S-6 solid wire for the GMAW of non-alloyed steels, as used in general construction, automotive components, pressure vessel fabrication and shipbuilding. OK Aristorod 12.50 is treated with ESAB's unique Advanced Surface Characteristics (ASC) technology, taking MIG/MAG welding operations to new levels of performance and all-round efficiency, especially in robotic and mechanised welding. Characteristic features include excellent start properties; trouble-free feeding at high wire speeds and lengthy feed distances; a very stable arc at high welding currents; extremely low levels of spatter; low fume emission; reduced contact tip wear and improved protection against corrosion of the wire.

<b>Classifications:</b>	AWS A5.18:ER70S-6
<b>Approvals:</b>	GL 3YS, BV SA3YM, DNV III YMS, ABS 3SA,3YSA, CWB CSA W48 ER49S-6, DB 42.039.29, LR 3S 3YS, VdTUV 10052
<b>Industry or Segmentation:</b>	Automotive, Industrial and General Fabrication, Mobile Equipment, Ship/Barge Building

Approvals are based on factory location. Please contact ESAB for more information.

Typical Tensile Properties				
Condition	Yield Strength	Tensile Strength	Reduction in Area	Elongation
<b>100% CO2</b>				
As Welded	448 MPa (65 ksi)	538 MPa (78 ksi)	70 %	25 %
<b>75% Ar - 25% CO2</b>				
As Welded	455 MPa (66 ksi)	565 MPa (82 ksi)	61 %	28 %
<b>90% Ar - 10% CO2</b>				
As Welded	455 MPa (66 ksi)	565 MPa (82 ksi)	56 %	27 %

Typical Charpy V-Notch Properties		
Condition	Testing Temperature	Impact Value
As Welded	-20 °C (-4 °F)	90 J (70 ft-lb)
As Welded	-30 °C (-22 °F)	70 J (51 ft-lb)
As Welded	-40 °C (-40 °F)	60 J (44 ft-lb)

Wire Composition %								
C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
0.08	1.46	0.85	0.012	0.013	0.04	0.03	0.01	0.07

Deposition Data			
Diameter	Amps	Deposition Rate	Efficiency (%)
0.8 mm (.030 in.)	100 A	1.13 kg/h (2.5 lb/h)	93 %
0.8 mm (.030 in.)	150 A	1.77 kg/h (3.9 lb/h)	93 %
0.8 mm (.030 in.)	200 A	2.95 kg/h (6.5 lb/h)	93 %
0.8 mm (.030 in.)	75 A	0.82 kg/h (1.8 lb/h)	93 %