FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de ventilação de motores elétricos de média/alta tensão

Ana Filipa Teixeira Salgueirinho

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas

setembro de 2019

© Ana Salgueirinho, 2019

Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de ventilação de motores elétricos de média/alta tensão

Ana Filipa Teixeira Salgueirinho

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

setembro de 2019

Resumo

Os motores elétricos de indução são cada vez mais utilizados, pois estes permitem transformar facilmente energia elétrica em energia mecânica. Dada a sua aplicação generalizada, estes motores são utilizados nas mais diversas situações, desde aplicações de baixa potência, a aplicações de elevada potência.

Como estes são aplicados em grande escala, é necessário ter uma preocupação acrescida em relação à sua eficiência energética, que quando é baixa se traduz num elevado consumo de energia.

Este problema leva a que os fabricantes de motores elétricos tentem aumentar a eficiência dos seus motores, dando por isso especial atenção ao arrefecimento destes, pois se este for incorreto pode reduzir significativamente a eficiência.

No entanto, estes problemas são mais notórios nos motores de média e alta tensão por apresentarem um consumo de energia mais elevado. Assim sendo, estes motores necessitam de apresentar um sistema de arrefecimento adequado, devendo ser aplicados ao longo do seu corpo várias peças, designadas por chapas de reforço equipadas, que não são mais do que chapas laminadas às quais são soldados pequenos perfis, desempenhando assim um papel de turbinas que permitem arrefecer, com mais facilidade, o rotor e o estator durante o funcionamento do motor.

Para estes motores de grande dimensão, estas chapas apresentam um grande tamanho e uma certa complexidade de fabrico, o que levou a empresa WEG a procurar o desenvolvimento de uma máquina automatizada capaz de produzir as chapas de reforço equipadas.

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvida uma máquina capaz de preparar pequenos perfis, que posteriormente são soldados por pontos em chapas de reforço, que fazem parte dos diferentes tipos de motores de média e alta tensão.

O desenvolvimento desta máquina teve várias fases. Inicialmente foi realizado um estudo prévio, no qual foi estudado o processo atual e os requisitos necessários para a produção destes componentes. A partir deste estudo, foi desenvolvida uma solução de princípio com as ideias principais de funcionamento que a nova máquina deve apresentar, e que deu origem a uma solução de construção, num modelo 3D.

A solução desenvolvida para este equipamento, divide-se em duas partes, a unidade de corte e a unidade de soldadura.

A unidade de corte é responsável por preparar os perfis a soldar, sendo necessário cortar e rebarbar os perfis obtidos a partir de barras de 6 m, utilizando máquinas de corte e de rebarbagem adequadas.

A segunda unidade de trabalho, tem como objetivo soldar os pequenos perfis radialmente nas chapas de reforço. Para isso, esta manipula os perfis, preparados na unidade de corte, dispondo-os devidamente sobre a chapa para serem soldados por pontos, um a um, por uma máquina de

soldadura por pontos e, assim, serem obtidas as ditas chapas de reforço equipadas.

Para a automatização deste equipamento, é apresentada um sistema de comando para garantir um correto funcionamento das várias partes constituintes, apresentando os esquemas de comando pneumático e os *Grafcets* comportamentais.

Depois de detalhar todas as funcionalidades, é exposta uma análise temporal que permite averiguar a eficiência da nova máquina, face ao processo atual na empresa.

Automatic machine for profile welding medium/high voltage electric motors ventilation plates

Abstract

Induction electric motors are increasingly used, as these allow to transform electrical energy into mechanical energy easily. Given its widespread application, these engines are used in various situations, from low power to high power applications.

As these are applied to a large scale, it is necessary to have an increased concern about their energy efficiency, which, when it is low, corresponds to higher energy consumption.

This problem compels the manufacturers of electric motors to try to increase the efficiency of their engines, giving special attention to the cooling solution. Therefore, an incorrect cooling of engine components can be translated into a signficant reduction in efficiency.

These problems are even more notorious in medium and high voltage engines by speeding up a higher energy consumption. Therefore, these engines need to present an adequate cooling system, and several parts must be applied throughout the body, designated by ventilation plates, which are not more than laminated sheets to which they small profiles are welded into, thus playing the role of turbines blades that allow cool of the rotor and stator during engine operation.

For these large motors, these plates also have a large size and a certain complexity of manufacturing, which led WEG company to seek the development of an automatic machine capable of producing ventilation plates.

Throughout this work, a machine was developed capable of preparing small profiles, which are subsequently welded by spot welding in ventilation plates, that are part of the different types of medium and high voltage motors.

The development of this machine had several phases. Initially a preliminary study was carried out, where the current process and the necessary requirements for the production of these components were studied. From this study, a solution of principle was developed with the main ideas of operation that the new machine should present, and a construction solution came up, in a 3d model.

The construction solution developed for this equipment is divided into two automatic machines: the "profile cutting unit" and the "spot welding unit".

The cutting unit is responsible for preparing the profiles to be welded, the process of cutting and deburr the profiles from 6 m long bars.

The second equipament unit, welds the small profiles radially on the ventilation plates. In order to do this, it manipulates the profiles, previously prepared in the cutting unit, placing then on the plates, one by one, and spot welding and thus creating the ventilation.

For automation of this equipment, a command system is presented for guaranteeing correct functioning of the various constituent parts, presenting the pneumatic control schemes and the behavioral Grafcets.

After detailing all functionalities, it is exposed a timis analysis that allow an evaluation of the produtivity of the new machine, considering the current process in the company.

Agradecimentos

A realização desta dissertação contou com importantes apoios e aos quais estarei eternamente grata.

Quero agradecer desde já ao meu Orientador Professor Francisco Freitas, pelo apoio incondicional e disponibilidade que teve ao longo de todo este trabalho e principalmente por tudo aquilo que me ensinou.

À empresa WEG pelo desafio que me propôs, pois permitiu o desenvolvimento deste projeto, sendo o tipo de projeto pelo qual sempre tive grande interesse. Ao Eng. Pedro Maia e ao Eng. Jorge Sousa que estiveram sempre disponíveis para esclarecer e ajudar em qualquer questão.

Um especial obrigado aos meus pais e a minha irmã, Liliana, por me terem ajudado não só durante o projeto, mas desde sempre, pois sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas e decisões.

Também quero agradecer ao meu namorado, Filipe Ferreira, que esteve comigo durante todos os momentos deste projeto, ajudando-me em qualquer situação.

Por fim, quero agradecer ao meu colega, António Lencastre, por todo o apoio e companhia ao longo desta dissertação, ao Senhor Joaquim pela paciência e ajuda e aos restantes amigos que me acompanharam e ajudaram a superar as minhas dificuldades ao longo destes anos.

A todos, um grande obrigada.

Ana Filipa Salgueirinho

Conteúdo

1 Introdução **1**

1.1 Contextualização 1

1.2 Apresentação da empresa WEG S.A. 2

1.3 Objetivos 4

1.4 Estrutura da dissertação 4

2 Apresentação do processo existente **7**

2.1 Motores de indução de média e alta tensão 7

2.2 Descrição do processo manual existente na WEG 13

2.2.1 Processo de preparação de perfis 13

2.2.2 Processo de soldadura de perfis 14

2.2.3 Análise do processo existente na WEG 16

2.2.4 Tempos de ciclo 17

2.3 Requisitos principais 19

2.3.1 Requisitos do processo 19

2.3.2 Requisitos ambientais 22

2.3.3 Requisitos de segurança 22

2.4 Conclusões 22

3 Estudo prévio **25**

3.1 Análise dos requisitos apresentados 25

3.1.1 Unidade de corte 26

3.1.2 Unidade de soldadura 27

3.2 Apresentação da solução de princípio 28

3.2.1 Unidade de corte 28

3.2.2 Unidade de soldadura 32

3.3 Conclusões 38

4 Apresentação da solução de construção **41**

4.1 Unidade de corte 41

4.1.1 Estrutura base da unidade de corte 43

4.1.2 Sistema de alimentação de barras 47

4.1.3 Sistema de ajuste automático do comprimento do perfil 50

4.1.4 Dispositivo de corte 51

4.1.5 Solução de rebarbagem 55

4.1.6 Armazenagem de perfis 60

4.1.7 Conjuntos auxiliares 64

4.2 Unidade de soldadura 67

4.2.1 Estrutura global 69

4.2.2 Mecanismo de soldadura 73

4.2.3 Mecanismo de posicionamento das chapas 83

4.2.4 Sistema de exaustão de fumos 85

4.2.5 Proteções 86

4.2.6 Armazenamento de chapas 86

4.3 Conclusões 87

5 Solução de comando **89**

5.1 Especificação dos movimentos 89

5.1.1 Movimentos da unidade de corte 89

5.1.2 Movimentos da unidade de soldadura 113

5.1.3 Esquemas pneumáticos 128

5.1.4 *Grafcets* comportamentais 129

5.2 Análise temporal 129

5.2.1 Unidade de corte 129

5.2.2 Unidade de soldadura 132

5.3 Conclusões 134

6 Conclusões e Trabalhos Futuros **135**

6.1 Conclusões 135

6.2 Trabalhos Futuros 136

Referências **137**

A Cálculos e dimensionamentos auxiliares **139**

A.1 Cálculos auxiliares para a escolha do atuador elétrico 139

A.2 Simulação estrutural da carruagem de soldadura 141

A.3 Dimensionamento das guias para movimento da carruagem de soldadura 145

B Esquemas pneumáticos **151**

B.1 Unidade de corte 151

B.2 Unidade de soldadura 155

C *Grafcets* comportamentais **157**

C.1 Unidade de corte 157

C.2 Unidade de soldadura 162

Lista de Figuras

1.1 Vista aérea da Fábrica WEG na Maia 3

2.1 Motor elétrico de indução e suas partes constituintes. 8
2.2 Motores elétricos de indução especiais. 10
2.3 Motor W22Xd de média/alta tensão com uma potência de 1600 kW. 10
2.4 Rotor de motor de média/alta tensão com várias chapas de reforço equipadas. . . 12
2.5 Representação das chapas de reforço do rotor e do estator. 12
2.6 Serrote mecânico utilizado para o corte. 13
2.7 Mó esmeriladora pneumática utilizada para rebarbagem. 14
2.8 Mesa e máquina de soldadura por pontos. 14
2.9 Elementos que garantem a qualidade dimensional do processo de produção de chapas de reforço equipadas. 15
2.10 Dimensões necessárias à soldadura de um perfil. 20
2.11 Secção dos perfis a soldar nas chapas. 20
2.12 Dimensões limite dos perfis a soldar nas chapas (figuras com a mesma escala). . . 21
2.13 Dimensões limite das chapas (figuras com a mesma escala). 21

3.1 Desenho de princípio da unidade de corte. 29
3.2 Desenho de princípio da mesa elevatória. 29
3.3 Desenho de princípio do mecanismo de alimentação das barras. 30
3.4 Desenho de princípio do sistema de corte. 30
3.5 Desenho de princípio das cassetes. 31
3.6 Inserção dos perfis nas cassetes. 32
3.7 Desenho de princípio da unidade de soldadura. 33
3.8 Desenho de princípio da mesa de soldadura. 34
3.9 Desenho de princípio da peça de centragem. 34
3.10 Desenho de princípio do dispensador de perfis. 35

3.11 Esquema representativo da alimentação de perfis. 35
3.12 Proposta de forqueta para o transporte do perfil até à chapa. 36
3.13 Proposta dos movimentos principais da unidade de soldadura. 37

4.1 Subconjuntos da unidade de corte. 42
4.2 Dimensões globais da unidade de corte. 43
4.3 Estrutura base da unidade de corte. 44
4.4 Detalhe de fixação estrutural e suspensão da estrutura base da unidade de corte. . 44
4.5 Posição das rampas de descida relativamente à estrutura base. 44
4.6 Representação das rampas de descida dos perfis. 45
4.7 Exemplificação do suporte das rampas de descida. 46
4.8 Ilustração do varão que articula os suportes das rampas 2 e 3. 46
4.9 Ilustração do suporte para alojamento do conjunto das cassetes. 47
4.10 Ilustração do armazém auxiliar para barras. 47
4.11 Sensor indutivo ($S1$) para detetar barras na mesa elevatória. 48
4.12 Mesa elevatória. 49
4.13 Garra de alimentação das barras. 49
4.14 Sistema de ajuste do comprimento do perfil. 51
4.15 Calcadores de fixação da barra durante o corte. 52
4.16 Desenho de especificação da máquina de corte. 54
4.17 Proteções da unidade de corte. 55
4.18 Solução de rebarbagem. 55
4.19 Detalhe do 1º dispositivo de rebarbagem. 56
4.20 Batente angular móvel do 1º dispositivo de rebarbagem. 57
4.21 Detalhe de instalação do 2º dispositivo de rebarbagem. 59
4.22 Proteções dos dispositivos de rebarbagem. 60
4.23 Proteção auxiliar do 2º dispositivo de rebarbagem. 60
4.24 Sistema de armazenamento de cassetes. 61
4.25 Atuador que empurra perfil para a zona de inserção dos perfis nas cassetes. 62
4.26 Representação da mesa de suporte das cassetes. 62
4.27 Desenho de detalhe construtivo de uma cassete. 63
4.28 Mecanismo de inserção de perfis nas cassetes. 64
4.29 Rampa de descida com bicos pneumáticos representados. 65
4.30 Depósitos para as limalhas da unidade de corte. 66

4.31 Ilustração das chapas colocadas entre as rampas de descida. 66
4.32 Representação dos fluxos de trabalho. 67
4.33 Desenho global da constituição da unidade de soldadura. 68
4.34 Dimensões gerais da unidade de soldadura. 69
4.35 Representação dos elementos da estrutura global. 70
4.36 Desenho de detalhe da base de soldadura. 70
4.37 Representação do suporte de soldadura. 71
4.38 Mesa de soldadura. 72
4.39 Ilustração das peças de centragem. 73
4.40 Representação da carruagem de soldadura. 74
4.41 Representação das guias lineares com carruagens de deslizamento. 74
4.42 Solução de acionamento da carruagem de soldadura. 75
4.43 Representação da pistola de soldadura. 75
4.44 Detalhe do movimento da carruagem de soldadura relativamente à mesa de soldadura. 76
4.45 Unidade de alimentação de perfis. 76
4.46 Suporte de fixação da mesa de alimentação de perfis. 77
4.47 Mesa de alimentação de perfis. 77
4.48 Solução do batente da mesa de alimentação de perfis. 78
4.49 Atuador alimentador de perfis. 79
4.50 Manipulador de perfis. 80
4.51 Desenho de especificação do manipulador. 80
4.52 Ilustração do atuador de elevação da forqueta e de verificação do 1º ponto de soldadura. 82
4.53 Detalhe da chapa de proteção do manipulador. 82
4.54 Mecanismo de posicionamento da chapa. 83
4.55 Detalhe do posicionador do sistema de posicionamento das chapas. 84
4.56 Sistema de exaustão. 85
4.57 Ilustração das grades de proteção. 86
4.58 Representação dos locais para empilhar chapas. 87

5.1 Movimento da mesa elevatória. 92
5.2 Movimento referente à alimentação da barra. 93
5.3 Esquema pneumático referente ao movimento de alimentação as barras. 94
5.4 Movimento do 1º calcador. 95

5.5 Esquema pneumático referente ao movimento dos calcadores. 96
5.6 Movimento do eixo linear. 98
5.7 Movimento de elevação do batente. 99
5.8 Esquema pneumático referente ao movimento de elevação do batente. 99
5.9 Movimentos da máquina de corte. 100
5.10 Esquema pneumático referente ao movimento da máquina de corte. 101
5.11 Movimento de rotação do batente de fim da rampa. 102
5.12 Esquema pneumático referente à rotação do batente angular móvel da rampa 2. . 103
5.13 Ilustração da atuação da garra pneumática. 104
5.14 Esquema de comando pneumático da garra. 104
5.15 Movimentos da operação de rebarbagem. 105
5.16 Esquema pneumático do atuador que transporta a máquina de rebarbagem. 106
5.17 Movimento de transporte do perfil. 107
5.18 Esquema pneumático do atuador que transporta o perfil. 108
5.19 Movimentos da 2ª rebarbagem. 109
5.20 Esquema pneumático dos movimentos do 2º dispositivo de rebarbagem. 109
5.21 Movimentos do atuador alimentador. 110
5.22 Esquema pneumático do atuador alimentador de perfis. 111
5.23 Movimentos dos atuadores para inserção de perfis. 112
5.24 Esquema pneumático dos atuadores responsáveis pela inserção dos perfis. 112
5.25 Movimentos de alimentação de perfis. 115
5.26 Esquema pneumático do atuador alimentador de perfis. 116
5.27 Movimento de inserção do perfil na forqueta. 118
5.28 Esquema pneumático do atuador responsável pelo movimento da mesa de alimentação. 119
5.29 Movimento de elevação da forqueta. 120
5.30 Esquema pneumático do atuador de elevação da forqueta. 121
5.31 Movimento de transporte da forqueta. 122
5.32 Esquema pneumático do atuador responsável pelo transporte da forqueta. 122
5.33 Movimento da carruagem de soldadura. 123
5.34 Movimento do elétrodo superior. 125
5.35 Movimento de verificação de soldadura. 126
5.36 Esquema pneumático do atuador verificador de soldadura. 126
5.37 Movimentos do sistema de posicionamento da chapa. 127

5.38 Esquema pneumático do atuador que eleva o posicionador. 128

A.1 Esquema representativo da mesa elevatória. 140
A.2 Estrutura da carruagem de soldadura antes da simulação. 142
A.3 Resultados da simulação relativamente à tensão de *Von Mises*. 143
A.4 Resultados da simulação relativamente ao deslocamento. 144
A.5 Esquema ilustrativo das forças aplicadas na estrutura da carruagem de soldadura. 146
A.6 Representação das forças reativas em função de $F1$ na direção x. 146
A.7 Representação das forças reativas em função de $F2$. 147
A.8 Ilustração de possíveis cargas a que as carruagens podem estar sujeitas. 148
A.9 Fator de segurança estático em função das condições de operação. 149
A.10 Fator para condições de carga. 149

C.1 *Grafcet* G1 da fase inicial do processo de corte. 158
C.2 Macrografcet M2 relativo à alimentação das barras. 159
C.3 Macrografcet M3 do corte da barra. 159
C.4 *Grafcet* G4 relativo à 1ª rebarbagem 160
C.5 *Grafcet* G5 relativo à alimentação de perfis para as cassetes. 161
C.6 *Grafcet* G1 relativo ao funcionamento da unidade de soldadura. 162
C.7 Macrografcet M2 do transporte de perfis. 163
C.8 Macrografcet M4 relativo à alimentação do perfil a partir das cassetes. 164
C.9 Macrografcet M5 da execução dos diferentes pontos de soldadura. 165
C.10 Macrografcet M6 do posicionamento da chapa. 166

Lista de Tabelas

2.1 Tempos do processo de corte. 18
2.2 Tempos do processo de soldadura. 18

4.1 Características do movimento elevatório. 48
4.2 Características dos atuadores para o arrasto das barras. 50
4.3 Características do atuador de elevação do batente que define o comprimento do perfil. 51
4.4 Características do atuador responsável por fixar a barra a cortar. 53
4.5 Características do atuador que executa o movimento de corte. 54
4.6 Características do atuador angular para batente. 57
4.7 Características da garra de fixação do perfil na rebarbagem. 57
4.8 Características do eixo linear usado no movimento de rebarbagem. 58
4.9 Características do eixo linear usado no movimento de transporte do perfil. 59
4.10 Características do atuador que empurra os perfis até à zona de inserção dos perfis nas cassetes. 61
4.11 Características dos atuadores para inserção de perfis nas cassetes. 65
4.12 Características do atuador responsável por mover a mesa de alimentação de perfis. 78
4.13 Características do atuador que empurra os perfis desde as cassetes até ao batente. 79
4.14 Características do atuador responsável por movimentar a forqueta. 81
4.15 Características do atuador responsável por elevar a forqueta e por verificar o ponto de soldadura. 82
4.16 Características do atuador para elevar o posicionador. 84

5.1 Duração das etapas do processo de preparação de perfis. 131
5.2 Duração das etapas do processo de soldadura de perfis. 133

A.1 Dados da mesa de elevatória da unidade de corte. 140
A.2 Forças aplicadas na carruagem e nas carruagens das guias. 147

Capítulo 1

Introdução

Para uma adequada compreensão da importância do tema desenvolvido neste trabalho, é efetuada uma contextualização que diz respeito ao desenvolvimento de um equipamento automático, para realizar a tarefa de soldadura por pontos de um elevado número de pequenas peças metálicas (perfis) sobre chapas metálicas de grande dimensão, mas de pequena espessura.

Estas são chapas típicas que constituem os corpos laminados dos rotores e dos estatores de motores elétricos de indução de grande potência nominal e que, portanto, são alimentados a tensões elevadas, enquadradas nos designados motores de média e alta tensões.

É, também, apresentada a empresa WEG, considerada um dos maiores fabricantes mundiais de acionamentos elétricos e por desafio da qual foi desenvolvido o presente projeto. Dado os anos de existência desta empresa é retratada a sua história e são apresentadas as fábricas existentes em Portugal, salientando os produtos nelas desenvolvidos.

Por fim, são expostos os principais objetivos da presente dissertação, assim como a sua estrutura.

1.1 Contextualização

A função dos motores elétricos é transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo que esta transformação provém da interação de dois campos magnéticos.

Os motores elétricos de indução, em particular, apresentam um custo reduzido, uma construção simples e uma enorme versatilidade de adaptação. Por isso, são muito utilizados quer em aplicações domésticas, de muito baixo binário, quer em aplicações industriais especiais, que requeiram enormes potências.

Por causa da aplicação generalizada dos motores elétricos como meio de atuação, têm de ser tidos em consideração alguns problemas que estes apresentam como, por exemplo, a sua eficiência energética e, consequentemente, o consumo de energia elétrica.

O elevado consumo de energia elétrica que os motores elétricos apresentam tem vindo a ser alvo de discussão nos últimos anos e levou os fabricantes de motores a terem uma preocupação acrescida em relação à eficiência energética que os motores elétricos devem apresentar, pois quanto maior for a eficiência menor a quantidade de energia que é desperdiçada.

Um dos principais responsáveis pela diminuição da eficiência energética dos motores é o aquecimento dos seus próprios componentes, pois quando o arrefecimento é deficiente o rendimento do motor diminui radicalmente, uma vez que a resistividade dos materiais é mais elevada. Desta maneira, existe uma preocupação acrescida relativamente ao arrefecimento dos motores elétricos, principalmente em relação aos motores de média e alta tensão, onde os valores de consumo de energia que são desperdiçados são potencialmente maiores e mais críticos.

Ao longo desta dissertação vai ser apresentado o projeto de uma máquina que tem como principal função automatizar um processo (que atualmente é manual) de soldadura de perfis em algumas das chapas laminadas que constituem o corpo quer do rotor quer do estator de um motor elétrico, para que estas passem a servir para realizar o arrefecimento interno de motores elétricos de indução de média e de alta tensão.

Nestas chapas, que passam a desempenhar uma função especial no motor, são radialmente soldadas umas peças metálicas que formam umas alhetas interiores por onde o ar é forçado a passar e assim a arrefecer o motor, como se de pás de uma turbina se tratasse. Dado o elevado tamanho dos motores de média e alta tensão, este processo torna-se bastante difícil de ser realizado manualmente, existindo necessidade de o tornar o mais automatizado possível com a conceção de um novo equipamento produtivo.

1.2 Apresentação da empresa WEG S.A.

A empresa WEG S.A é uma multinacional brasileira, sediada em Jaraguá do Sul, no estado de Santa Catarina, no Brasil [1].

Destina-se a fabricar equipamentos elétricos que são utilizados em diferentes áreas, tais como:

- geração e produção de energia;
- comando e proteção;
- automação de processos industriais;
- equipamentos para variação de velocidade;
- produção de tintas e vernizes.

Esta empresa foi fundada em 1961, por Werber Voigt, Eggon Silva e Geraldo Werbubghaus (um eletricista, um administrador e um mecânico), tendo sido designada inicialmente por "Eletromotores Jaraguá", passando a designar-se mais tarde por WEG [2].

O principal e primeiro equipamento a ser produzido na altura da sua fundação foi o motor elétrico. No entanto, a WEG ampliou as suas atividades e hoje em dia é considerada como um dos maiores fabricantes de equipamentos elétricos do mundo [2].

Ao longo da sua história, a empresa WEG, sofreu um enorme crescimento. Neste momento, está representada em 29 países, possui fábricas em 12 países e o seu portfólio conta com mais de 460 linhas de produtos na sua produção [1].

Em Portugal existem duas fábricas, a primeira está na Maia, desde 2002. Nesta fábrica, são fabricados motores de baixa, média e alta tensão com potências até 9 MW e tensão de alimentação até 11000 V. Esta fábrica é destacada, pela excelência no fabrico de motores de indução antideflagrantes, desenvolvidos à medida para aplicações especiais [1].

A segunda fábrica, localizada em Santo Tirso, destina-se principalmente à produção de componentes elétricos de baixa tensão, nomeadamente motores de indução com potência até 660 kW e quadros elétricos industriais [1].

Além dos produtos anteriormente referidos, nas duas fábricas WEG, existem áreas de investigação e desenvolvimento, bem como laboratórios de teste, que asseguram que os equipamentos fabricados atendam aos requisitos do cliente.

A fábrica da WEG na Maia têm uma área total de 19590 m^2 e a fábrica de Santo Tirso possui uma área total de 43364 m^2. As duas unidades contam com mais de 600 colaboradores [1].

Figura 1.1 - Vista aérea da Fábrica WEG na Maia
[3].

1.3 Objetivos

A presente dissertação, realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo Automação, tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma máquina de soldadura automática, por pontos, de perfis em chapas de ventilação de motores de média/alta tensão, e que solucione algumas das necessidades existentes no processo de fabrico de motores, atualmente existente na WEG.

O principal objetivo é a diminuição da intervenção humana na produção, substituindo a tarefa monótona, repetitiva e com significativos problemas de segurança, por uma solução com maior eficácia, rapidez do processo e muito menor exigência humana, mas sem comprometer a qualidade do produto.

Além da soldura automática de perfis, esta máquina deverá ser capaz de preparar previamente os próprios perfis a soldar, isto é, cortar os perfis a partir de barras de 6 m, sendo seguidamente rebarbados para eliminar eventuais aparas e ainda empilhá-los ordenadamente para serem disponibilizados para o processo de soldadura automática.

O desenvolvimento desta solução inclui a escolha e o dimensionamento dos meios de acionamento necessários, o seu comando e a automatização global do processo.

O equipamento a desenvolver deve ser eficaz, flexível e ainda estar preparado para que no futuro possa sofrer eventuais melhorias que se revelem apropriadas à evolução crescente dos requisitos dos motores elétricos.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos:

- introdução;
- apresentação do processo existente;
- estudo prévio;
- apresentação da solução de construção;
- solução de comando;
- conclusões.

O presente capítulo serve como introdução ao tema que é abordado e é iniciado com a explicação dos conceitos básicos relativamente aos motores elétricos. Seguidamente, é apresentada a empresa que colocou o desafio do desenvolvimento do presente projeto e, por fim, os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 começa por apresentar vários conceitos relativamente aos motores elétricos de indução de média e alta tensão, para que sejam de mais fácil compreensão os diferentes assuntos

retratados ao longo deste trabalho. Além disso, este capítulo evidencia o funcionamento e requisitos do processo existente na WEG, que será alvo de melhoria com o desenvolvimento de um novo equipamento.

O terceiro capítulo conta com o estudo prévio, que tem como objetivo analisar na integra os vários requisitos do processo atual, para que sejam superados os principais problemas. É ainda apresentada a solução de princípio, em que constam as ideias predominantes do novo equipamento.

Após a realização da solução de princípio, foi concebida uma solução de construção em *SolidWorks* e que é apresentada no Capítulo 4. Esta solução apresenta o projeto de construção, transformando as ideias de princípio em elementos reais e possíveis de conceber.

O Capítulo 5 diz respeito à solução de comando previsto para o funcionamento do novo equipamento desenvolvido para que seja o mais automatizado possível. Para completar esta proposta são apresentados os esquemas pneumáticos e os *Grafcets* comportamentais.

Este capítulo, conta ainda com uma análise temporal das várias etapas do processo, para ser apreciável a eficiência do processo com nova máquina relativamente ao processo existente atualmente na WEG.

Por fim, o último capítulo é constituído principalmente pela conclusão e são ainda apresentadas sugestões de melhoria ao trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Apresentação do processo existente

Neste capítulo é descrito o processo atual de produção das chapas de rotor e de estator para o arrefecimento interno de motores elétricos de indução de média e alta tensão.

E para uma melhor compreensão do tema a abordar, são explicados inicialmente alguns conceitos básicos sobre motores elétricos de indução, tais como:

- constituição;
- princípio de funcionamento;
- problemas energéticos associados;
- regulamentação sobre eficiência energética de motores;
- soluções de arrefecimento de motores de média e alta tensão;
- nomenclatura utilizada.

Além dos conceitos e do processo atual, são também apresentados os requisitos propostos pela empresa WEG, para que o equipamento a desenvolver cumpra as necessidades de qualidade da produção das chapas de reforço equipadas que fazem parte dos motores de indução de média e alta tensão.

Por fim, são apresentados os requisitos ambientais e de segurança que têm um papel importante no desenvolvimento de um novo equipamento.

2.1 Motores de indução de média e alta tensão

Para os motores elétricos produzirem um movimento, é necessário criar dois campos de forças, que são campos magnéticos, e que podem ser criados através da utilização de materiais magnéticos ou cargas elétricas em movimento (corrente elétrica).

O primeiro campo magnético encontra-se na parte fixa do motor, designada por estator, e o segundo campo magnético está integrado na parte móvel do motor, denominada de rotor.

Na Figura 2.1 está representada a constituição básica de um motor elétrico de indução, onde têm particular relevância funcional o rotor e o estator.

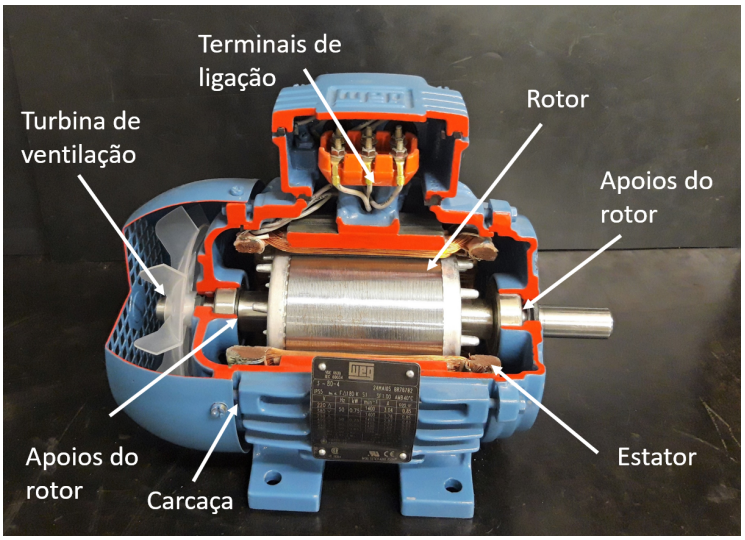


Figura 2.1 - Motor elétrico de indução e suas partes constituintes.

Devido às suas propriedades magnéticas, os dois campos de forças vão interagir entre si e criar uma força mecânica, *Força de Lorentz*, que por sua vez gera um binário sobre a parte móvel do motor, o rotor, fazendo com que este rode continuamente, relativamente ao estator, produzindo assim um movimento mecânico [4].

Existe uma grande variedade de motores elétricos e estes podem possuir diferentes classificações. Contudo, o mais comum é serem caracterizados em função do tipo de corrente de alimentação: corrente contínua ou corrente alternada (monofásicos ou trifásicos) e, em função do tipo de campo magnético que é criado no rotor.

Dentro dos motores de corrente contínua (CC), existem dois grandes tipos de motores [4]:

- **de rotor bobinado com escovas** - o rotor é constituído por uma bobina que, ao ser percorrida por corrente elétrica, cria um campo magnético. Existe a necessidade de utilizar escovas para tornar o campo magnético variável e, assim, o rotor girar continuamente;
- **rotor de íman permanente sem escovas** - o campo magnético do rotor é criado por um íman.

Os motores de corrente alternada (CA) podem ser divididos em [4]:

- **motores síncronos** - a velocidade de rotação do motor é igual à velocidade do campo magnético girante, dos quais podem ser destacados os motores de íman permanente e os de relutância;

- **motores assíncronos** - a velocidade de rotação do rotor é marginalmente diferente da velocidade do campo magnético girante criado no estator. Os principais motores deste género são os motores de indução, com rotor bobinado, ou os que têm o rotor em "curto circuito" com construção em gaiola de esquilo.

Apesar da grande variedade de motores, os mais utilizados em aplicações industriais são os motores assíncronos de corrente alternada (CA) de indução de rotor em "curto circuito"com construção em gaiola de esquilo. Esta preferência deve-se ao facto de estes motores precisarem de baixa manutenção e a distribuição de energia elétrica ser feita normalmente em corrente alternada e, por isso, são mais fáceis de instalar não havendo necessidade de utilizar qualquer outro equipamento de conversão de energia.

Esta baixa manutenção deve-se ao facto de, nestes motores, não existir qualquer interligação entre a corrente elétrica que percorre o estator e a corrente elétrica que percorre o rotor, uma vez que esta é integralmente criada por indução do campo magnético variável criado no estator, como se de um transformador de tratasse.

Este tipo de motores abrangem uma grande variedade de aplicações, desde aplicações que requerem baixas potências, como aplicações genéricas industriais, comerciais e residenciais, até aplicações que necessitam de elevadas potências e funcionamento contínuo, 24h sobre 24h, como as da indústria química, da indústria do óleo e do gás, da indústria siderúrgica, e para o acionamento de bombas de água, de compressores e de ventiladores para minas ou túneis, por exemplo.

Existe ainda uma variedade de aplicações especiais em que os motores devem ser robustos para suportar condições ambientais agressivas (por exemplo atmosferas explosivas ou marítimas), havendo por vezes necessidade de os motores possuírem características antideflagrantes, serem não inflamáveis e serem à prova de ignição (poeiras).

Na Figura 2.2 é possível observar alguns motores de média e de alta tensão, fabricados pela empresa WEG para aplicações que necessitam elevada potência. Como nesta figura não é possível representar a escala real dos motores, é apresentada a Figura 2.3 para que haja consciência da dimensão destes motores.

A aplicação em cada vez maior escala deste tipo de motores que, mesmo nas melhores condições de funcionamento, possuem cerca de 5 a 7% de perdas energéticas, constitui uma parcela muito elevada de perda de energia, principalmente na indústria, pois na maior parte dos países desenvolvidos, o motor elétrico é o maior consumidor de energia elétrica, representando cerca de 43% da energia total consumida. No entanto, dentro da indústria, os motores elétricos são responsáveis por mais de 60% do consumo de energia elétrica [5].

Dados os valores significativos do consumo de energia, algumas entidades reguladoras, como por exemplo a União Europeia, a IEC e a NEMA nos EUA, foram levadas a emitir vários regulamentos que têm como objetivo a imposição de regras para a diminuição do consumo de energia dos motores elétricos [6].

(a) Motor de Alta Tensão uso geral - W22 [7].

(b) Motor de Alta Tensão uso geral- WGM20 [8].

(c) Motor de Alta Tensão uso geral- Master [9].

(d) Motor de Alta Tensão atmosferas explosivas-W50Xn [10].

Figura 2.2 - Motores elétricos de indução especiais.

Figura 2.3 - Motor W22Xd de média/alta tensão com uma potência de 1600 kW.

Segundo a norma IEC 60034-30-1 (que é uma das mais globais), existem 4 classes de eficiência IE (International Efficiency) para motores AC que expressam o grau de eficiência (rendimento) de cada motor[11]:

- IE1 - eficiência *standard*;
- IE2 - eficiência elevada;
- IE3 - eficiência premium;
- IE4 - eficiência super premium.

Uma das principais causas da diminuição de eficiência dos motores deve-se ao sobreaquecimento dos elementos do próprio motor.

Deste modo, existe por parte dos fabricantes de motores uma preocupação acrescida no que diz respeito à monitorização da temperatura e ao arrefecimento dos motores.

No caso dos motores de baixa tensão, o arrefecimento é fácil de conseguir, pois devido ao seu tamanho "reduzido"é suficiente a inclusão de uma ventoinha e/ou de corpos alhetados na carcaça para viabilizar a ventilação forçada.

Porém, nos motores de média e alta tensão é necessário ter uma solução mais acautelada em relação à forma como é feito o seu arrefecimento pois, caso contrário, os problemas energéticos podem ser muito críticos. Por exemplo, perdas térmicas de 5% num motor de 1 MW de potência nominal correspondem à necessidade de 50 kW de energia térmica a ser retirada do motor.

Algumas das soluções implementadas neste tipo de motores para garantir o seu arrefecimento, consistem em aplicar um arrefecimento extra no seu interior, a ar ou a água.

Para as soluções em que o arrefecimento interior é feito com recurso a ar, é necessário criar ao longo do rotor e do estator vários canais de ventilação, denominados de alhetas, por onde o ar irá ser direcionado.

Estas alhetas são criadas por alteração de algumas das chapas laminadas, que constituem quer o corpo do rotor, quer o corpo do estator, através da soldadura de elementos metálicos, com uma configuração particular, passando estas chapas a ser designadas por chapas de reforço "equipadas". Estas, por sua vez, são colocadas intercaladas com as muitas chapas de reforço laminadas que formam o rotor e o estator, pois neste tipo de motores o rotor e o estator não são um bloco de material maciço, mas sim um aglomerado de chapas com cerca de 1 mm de espessura, que são justapostas e compactadas, dando origem a um corpo rígido.

A Figura 2.4 representa o rotor de um motor com as diferentes chapas de reforço "equipadas" colocadas espaçadamente entre as restantes chapas do rotor e que constituem, para todos os efeitos, uma turbina com as suas pás associadas e alinhadas entre o rotor e o estator.

Os componentes soldados, para criar as ditas alhetas, são pequenos perfis de aço, em "I", soldados através de soldadura por pontos, à chapa respetiva quer do rotor quer do estator.

A Figura 2.5 representa a configuração normal das chapas de reforço do rotor e do estator e uma chapa de reforço equipada do rotor com os perfis já soldados.

Em cada motor pode existir um número significativo de chapas de reforço equipadas e cada uma destas chapas têm um número grande de perfis soldados, o que torna este processo produtivo muito repetitivo para a fabricação de um único motor.

Além disso, algumas das chapas dos rotores e dos estatores apresentam um largo diâmetro e uma baixa espessura, o que requer um maior cuidado e com a necessidade de mais do que um operador para colocar e remover a chapa da mesa de trabalho.

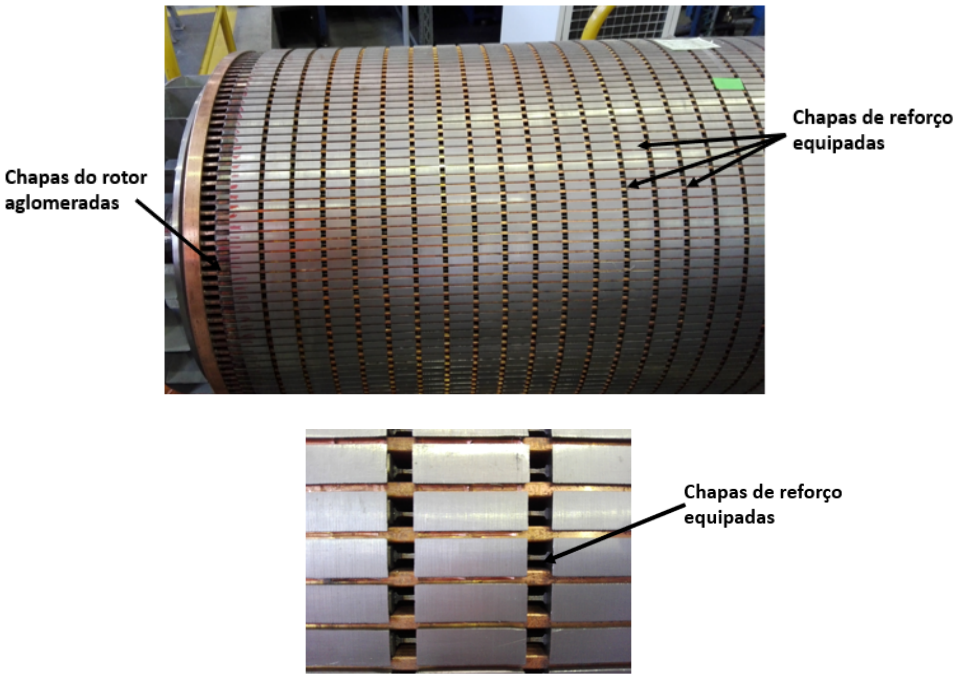
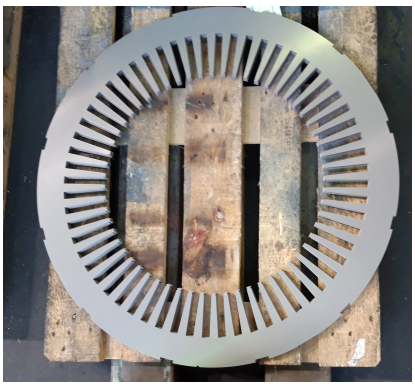
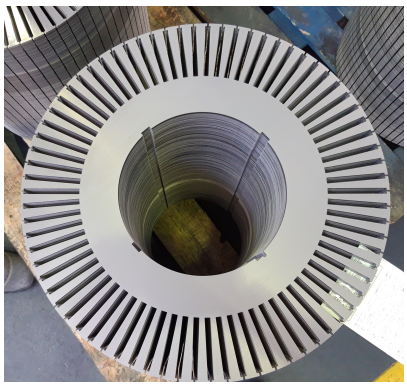


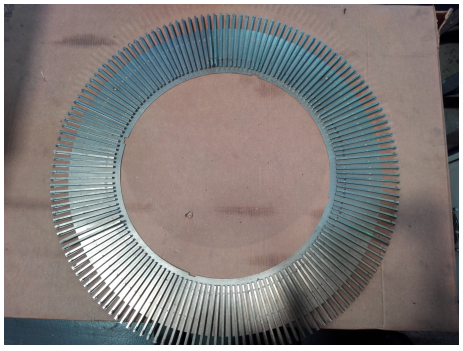
Figura 2.4 - Rotor de motor de média/alta tensão com várias chapas de reforço equipadas.



(a) Chapa de reforço do estator.



(b) Chapa de reforço do rotor.



(c) Chapa de reforço equipada do rotor.

Figura 2.5 - Representação das chapas de reforço do rotor e do estator.

2.2 Descrição do processo manual existente na WEG

O processo atualmente existente na empresa para a produção de chapas de reforço equipadas para motores de média e alta tensão, é composto por:

- **preparação dos perfis a soldar**, a partir de barras de 6 m;
- **soldadura dos perfis**, onde os perfis anteriormente cortados são soldados às chapas de reforço do rotor e do estator, para criar as ditas chapas de reforço equipadas.

2.2.1 Processo de preparação de perfis

Antes de ser realizado o corte, existe necessidade de ajustar o serrote em função do comprimento do perfil desejado e preparar as barras a cortar.

Dada a reduzida dimensão da secção nominal do perfil $(10 \times 5\ mm)$, é executado o corte simultâneo de 16 barras de 6 m, que são adequadamente consolidadas e, seguidamente, com recurso a um serrote mecânico, são cortadas em simultâneo, obtendo-se os vários conjuntos de perfis elementares. Estes conjuntos de perfis, por sua vez, são de diferentes tamanhos consoante o tamanho do motor onde irão ser utilizados.

Na Figura 2.6 está representado o equipamento de corte utilizado na empresa WEG.

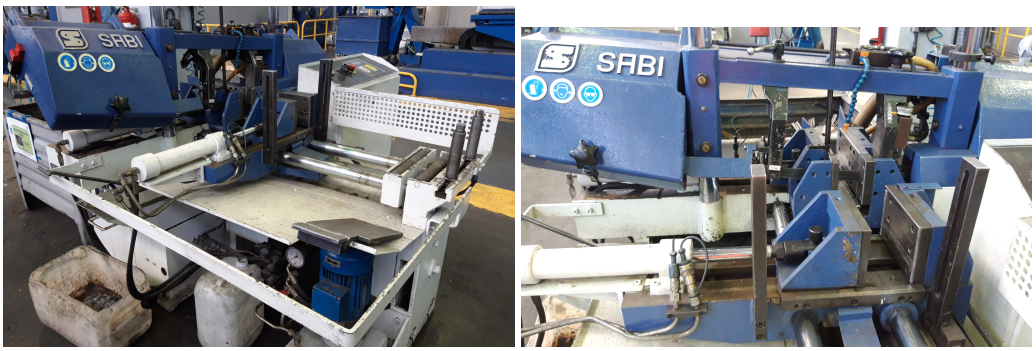


Figura 2.6 - Serrote mecânico utilizado para o corte.

Em seguida, após a obtenção dos vários conjuntos de perfis com o devido comprimento, é necessário rebarbar as duas extremidades de cada perfil para eliminar eventuais irregularidades superficiais e rebarbas provenientes do corte, sendo este processo manual. O operador rebarba as duas faces, perfil a perfil, numa mó de esmeril, como apresentado na Figura 2.7.

Posteriormente, os perfis são encaixotados e contados para passarem para o processo de soldadura.

Figura 2.7 - Mó esmeriladora pneumática utilizada para rebarbagem.

2.2.2 Processo de soldadura de perfis

O processo de soldadura atual é constituído principalmente por uma mesa de soldadura estática onde são colocadas as chapas a soldar e à qual está associada uma máquina de soldadura por pontos, como se pode observar na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Mesa e máquina de soldadura por pontos.

Ao longo da execução do processo de soldadura é necessário garantir que não ocorre nenhum dos seguintes problemas:

- desalinhamento do centro da chapa em relação ao centro da mesa de soldadura;
- inadequado posicionamento do perfil relativamente aos elétrodos da máquina de soldadura e ao dente da chapa;
- inadequado espaçamento entre os perfis soldados, o que implica que o operador tenha de rodar sempre o mesmo ângulo cada vez que move a chapa;

Para evitar que tais dificuldades surjam ao longo do processo, existem vários elementos dispostos no tampo da mesa:

- **a) três batentes de centragem,** com a forma de meia lua, que garantem que a chapa fica centrada na mesa;
- **b) uma ferramenta de posicionamento,** com forma retangular, que tem uma largura semelhante ao espaço entre os dentes das chapas, permitindo definir a localização angular da chapa para ser efetuada a soldadura do próximo perfil;
- **c) um batente de perfil,** que permite posicionar radialmente o perfil em relação ao dente da chapa e aos elétrodos da máquina de soldadura e auxiliar à fixação do perfil durante a soldadura que é realizada por manualmente.

Na Figura 2.9 estão representados os elementos a), b) e c) que são inseridos e fixados em rasgos existentes no tampo da mesa e ajustáveis manualmente consoante a dimensão dos perfis e da chapa a soldar.

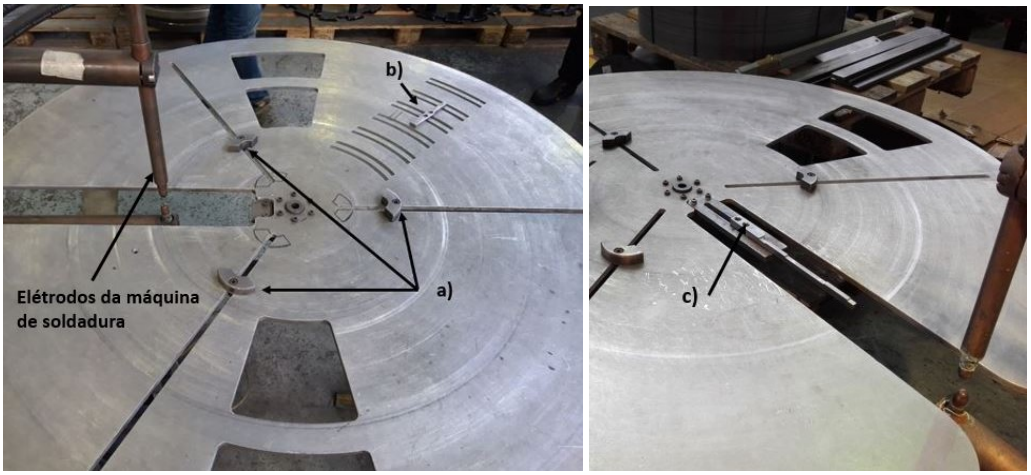


Figura 2.9 - Elementos que garantem a qualidade dimensional do processo de produção de chapas de reforço equipadas.

A máquina de soldadura utilizada é uma máquina convencional de soldadura por pontos, com uma potência de 12/20 *kVA* e de acionamento pneumático, com comando por um pedal, que é possível observar na Figura 2.8.

Antes de executar qualquer ponto efetivo de soldadura, o operador tem de executar várias tarefas que permitem ajustar o equipamento ao tamanho da chapa a soldar.

As operações de ajuste inicial são as seguintes:

- Posicionamento radial da mesa relativamente à máquina de soldadura, para realizar "um" dos pontos de soldadura em todas as chapas de um motor;
- Alinhamento angular da mesa com os elétrodos da máquina de soldadura;

- Ajuste dos 3 batentes de centragem da mesa em função do diâmetro interior da chapa;
- Ajuste da posição da ferramenta de localização angular da chapa;
- Ajuste do batente de encosto do perfil a soldar;
- Verificação do rigor dos ajustes efetuados.

Após as operações de ajuste inicial, o operador coloca uma chapa centrada sobre a mesa de soldadura e assegura-se de que a ferramenta de localização angular está corretamente inserida no espaço vazio entre dois dentes da chapa, garantindo assim o perfeito alinhamento do dente com o elétrodo de soldadura.

Seguidamente, o perfil é posto sobre o dente e encostado ao batente de perfil, sendo assim mantido fixo pelo operador, até ser executado o primeiro ponto de soldadura num dos extremos do perfil.

Por último, a chapa é rodada pelo operador para a próxima posição angular de soldadura e é executado o 1º ponto de soldadura no próximo perfil.

No final da realização sequencial do 1º ponto de soldadura em todos os perfis, a chapa é retirada da mesa e é colocada uma nova chapa para realizar o 1º ponto de soldadura em todos os perfis, e assim sucessivamente até todas as chapas terem o 1º ponto de soldadura efetuado.

Após a realização de todos os primeiros pontos, inicia-se a execução sequencial dos segundos pontos de soldadura, na outra extremidade de cada perfil, ficando desta forma os perfis soldados nas duas extremidades. Quando esta chapa estiver completa, executam-se os segundos pontos na próxima chapa.

À semelhança do que acontece no 1º ponto de soldadura também é necessário o operador ajustar novamente a posição da mesa de soldadura para executar o 2º ponto de soldadura, operação que é morosa e potencialmente criadora de erros no processo.

No caso de perfis com um comprimento superior a 100 *mm*, é necessário executar um terceiro, ou até mesmo um quarto, ponto de soldadura ao longo do comprimento do perfil.

Para a produção de chapas de reforço equipadas com diâmetros muitos elevados, as chapas têm de ser cortadas em setores iguais e soldar os perfis em cada um dos setores, pois a mesa de soldadura é pequena para estas.

2.2.3 Análise do processo existente na WEG

Como em todos os processos existem pequenos problemas que podem ser identificados, tanto associados ao processo de corte dos perfis como ao processo de soldadura.

No que diz respeito ao corte de perfis, os problemas relativos à produção estão relacionados sobretudo com o rigor do comprimento dos perfis, que pode ser incorreto, e com a qualidade

superficial das faces rebarbadas. Estas podem constituir um risco de dano para o operador e serem potenciadoras de geração de limalhas que se podem libertar posteriormente dentro do processo ou com o início de funcionamento do motor.

A adversidade complementar que este processo enfrenta é a demora da realização da rebarbagem dos perfis, a exigência física e a sujeição a ambiente inadequado para o operador.

No processo de soldadura, os problemas que podem surgir durante a produção das chapas de reforço equipadas, são os seguintes:

- Perfis desalinhados em relação aos dentes da chapa - este problema surge principalmente por má fixação do perfil. Caso isto aconteça, este perfil deve ser retirado e soldado novamente;
- Pontos de soldadura mal executados - neste caso, o perfil fica mal soldado e poderá vir a soltar-se da chapa e cair.

Relativamente à execução do processo de soldadura, o seu tempo de realização tem um peso considerável.

A rotação da chapa apresenta algumas dificuldades, pois o operador tem de a elevar ligeiramente para a libertar da ferramenta de localização angular e, ao mesmo tempo, roda a chapa de modo a esta ser posicionada na próxima ranhura. A maior parte das vezes esta próxima ranhura não encaixa corretamente na ferramenta, o que exige algum esforço por parte do operador. Além disso, nas chapas de maior diâmetro é difícil executar este movimento que exige um certo rigor.

O ajuste inicial dos componentes que garantem um correto posicionamento da chapa é também moroso e difícil de efetuar com precisão na chapa.

2.2.4 Tempos de ciclo

As características temporais são importantes no processo atual e devem ser tidas em consideração, nomeadamente os tempos de ciclo, pois devem servir de referência para que no desenvolvimento da nova solução automática sejam superados, de modo a que o processo seja indiscutivelmente mais rápido e eficiente.

2.2.4.1 Tempos de ciclo no processo de corte de perfis

O processo de corte de perfis apresenta algumas etapas que são apresentadas na Tabela 2.1 com os respetivos tempos de ciclo.

Tabela 2.1 - Tempos do processo de corte.

Etapas	**Tempo de etapa [*min*]**
Preparação de 16 barras de 6 *m*	15
Um corte de 16 barras (16 perfis)	1
Rebarbagem de 100 perfis	60

Desta maneira, pode concluir-se que caso se pretenda cortar 16 barras em perfis de 300 *mm* (320 perfis), teremos 20 cortes com um total de 20 *min* de corte mais 15 *min* de preparação, o que resulta num tempo total de 35 *min*.

No processo de rebarbagem, os atrás mencionados 320 perfis demoram mais 3 horas a serem rebarbados e, portanto, o tempo total de preparação destes perfis excederia 3*h* 30*min*.

2.2.4.2 Tempos de ciclo no processo de soldadura

As etapas do processo de soldadura possuem os tempos representados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Tempos do processo de soldadura.

Etapas	**Tempo de etapa [*min*]**
Preparação dos equipamentos para 1º ponto de soldadura	15 *min*
Ciclo de soldadura do 1º ponto de um perfil	12 *s*
Preparação do equipamento para o próximo ponto de soldadura	5 *min*
Ciclo de soldadura do 2º ponto de um perfil	3,6 *s*

Após a análise destes tempos é possível concluir que para soldar 100 perfis de 300 mm, ou seja, 4 pontos de soldadura ao longo do comprimento do perfil, demora:

- 15 *min* para preparação do 1º ponto de soldadura;
- 20 *min* para executar o primeiro ponto de soldadura em todos os perfis;
- 5×3 *min* para preparação dos restantes 3 pontos de soldadura;
- 6×3 *min* para executar os restantes 3 pontos de soldadura em todos os perfis.

No final, somando todas as etapas dá um total de 1*h* 50*min* para soldar 100 perfis numa chapa.

No caso de um motor precisar de 10 chapas de ventilação para o rotor e 10 chapas para o estator, o processo de soldadura demora teoricamente quase 5 turnos, ou seja, quase dois dias, com 3 turnos por dia, para produzir 20 chapas com 100 perfis cada uma.

2.3 Requisitos principais

2.3.1 Requisitos do processo

Para que a máquina a desenvolver apresente um funcionamento eficiente e seja mantida a qualidade dos motores produzidos, é necessário cumprir alguns requisitos.

Para produzir um motor deve ser gerado um número adequado de perfis para serem soldados nas chapas de rotor e um outro número de perfis, eventualmente de dimensão diferente, que irão ser soldados nas chapas do estator.

O processo de produção de perfis, como já referido anteriormente, consiste no corte de perfis a partir de barras de 6 *m* ou seus submúltiplos que, posteriormente, devem ser devidamente rebarbados para eliminação de irregularidades superficiais e de rebarbas criadas durante o corte. No caso de as rebarbas não serem totalmente eliminadas podem-se soltar durante o funcionamento do motor e causar graves problemas de qualidade.

Desejavelmente, os perfis devem ser agrupados no número requerido para cada chapa, quer de rotor quer de estator, e contados. Estes não são, necessariamente, de igual número nem de igual comprimento sendo, no entanto, todos os perfis de igual secção.

Após a preparação dos perfis, estes devem ser soldados nas chapas do rotor e nas do estator.

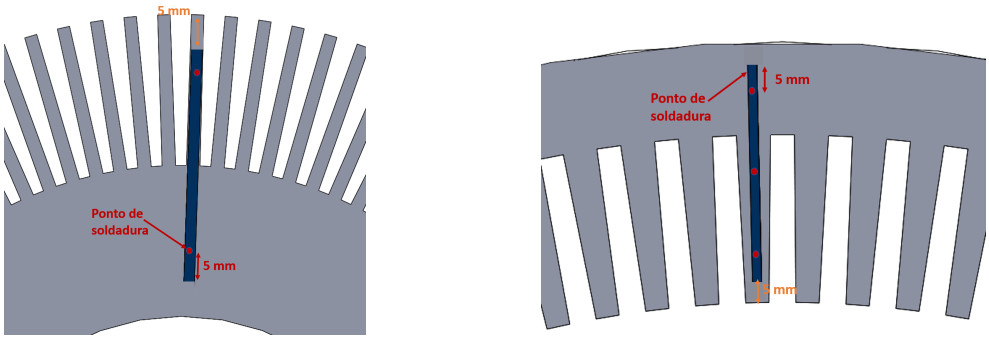
A soldadura dos perfis é realizada no centro de cada um dos "dentes" existentes, quer na chapa do rotor quer na chapa do estator, sendo que estes "dentes" nas chapas dos rotores encontram-se na periferia exterior das chapas e nas chapas dos estatores na periferia interior das mesmas.

Os perfis a soldar podem apresentar diferentes comprimentos consoante o diâmetro interno e externo da chapa. No entanto, a posição em que vão ser soldados é sempre definida em relação à extremidade do dente da chapa. No caso do rotor corresponde ao diâmetro mais externo, e no caso do estator corresponde ao diâmetro mais interno. Essa distância deve ser cerca de 5 *mm* (Figura 2.10).

Uma outra distância importante que deve ser tida em consideração, é a distância desde a extremidade do perfil ao 1º ponto de soldadura, que é constante e deve ser, também, cerca de 5 *mm* (Figura 2.10). No caso dos pontos intermédios, o terceiro e quarto pontos, devem ficar equidistantes em relação aos pontos efetuados nos extremos do perfil.

Sendo os perfis soldados sobre cada um dos respetivos dentes da chapa, a sua distribuição radial deve ser o mais rigorosa possível sobre o centro de cada dente, para evitar desvios de equilíbrio do centro de gravidade do motor.

Para que não ocorram desalinhamentos do perfil em relação à chapa, e o ponto de soldadura seja bem executado, este deve ser mantido bem fixo, pelo menos, durante a execução do primeiro ponto de soldadura.



(a) Dimensões em relação a chapa do rotor. (b) Dimensões em relação a chapa do estator.

Figura 2.10 - Dimensões necessárias à soldadura de um perfil.

Depois de realizadas todas as soldaduras de perfis, as chapas resultantes são certamente mecanicamente mais robustas, mas também mais pesadas devido à junção de muitos perfis que, embora de pequena massa, incrementam na sua totalidade um peso significativo, podendo eventualmente ter de ser manipuladas por mais do que um operador.

É importante referir ainda os requisitos dimensionais que estão relacionados com as dimensões limite dos vários constituintes a serem trabalhados: o comprimento dos perfis a serem soldados e o diâmetro interno e externo das chapas de reforço do rotor e do estator.

Os perfis a serem soldados apresentam sempre a mesma secção, altura=10 *mm* e largura = 5 *mm* (Figura 2.11), mas com um comprimento que pode variar de 5 em 5 *mm*, entre 50 *mm* e 300 *mm*, como se pode verificar na Figura 2.12.

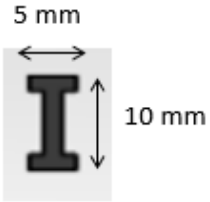


Figura 2.11 - Secção dos perfis a soldar nas chapas.

Desta forma, consoante o comprimento do perfil, os pontos de soldadura a executar variam da seguinte maneira:

- se o perfil apresentar um comprimento **inferior a 100 *mm***, devem ser executados 2 pontos de soldadura;
- se o comprimento for **entre 101 e 200 *mm***, deverão ser executados 3 pontos de soldadura;
- para comprimentos **superiores a 201 *mm***, deverão ser executados 4 pontos de soldadura.

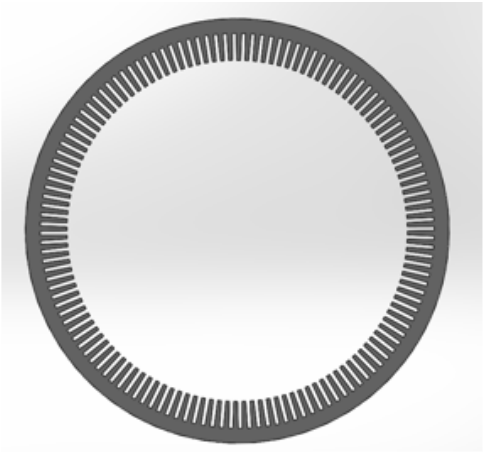
(a) Perfil de menor dimensão (l=50 *mm*).

(b) Perfil de maior dimensão (l=300 *mm*)

Figura 2.12 - Dimensões limite dos perfis a soldar nas chapas (figuras com a mesma escala).

As chapas do rotor e do estator, apesar de possuírem sempre a mesma espessura, de 1 *mm*, apresentam diâmetros muito diferentes. O diâmetro interno mínimo das chapas do rotor a considerar é de 170 *mm* e o diâmetro externo máximo das chapas do estator deve ser 1420 *mm*, que se encontram representadas na Figura 2.13.

(a) Chapa de menor dimensão (Diâmetro interno=170 *mm*).



(b) Chapa de maior dimensão (Diâmetro externo=1420 *mm*)

Figura 2.13 - Dimensões limite das chapas (figuras com a mesma escala).

O número de dentes que as chapas podem possuir, assim com o ângulo entre eles, é muito variável e depende do projeto elétrico definido para cada motor, podendo apenas afirmar-se que o número máximo de perfis soldados por chapa é cerca de 120 perfis.

2.3.2 Requisitos ambientais

Além dos requisitos de funcionamento e de qualidade produtiva que o processo tem necessidade de cumprir existem outras exigências que devem ser tidas em consideração.

Este processo gera resíduos pelo que deve existir a necessária preocupação de os encaminhar para um local de recolha de forma a não prejudicar o ambiente laboral e a qualidade de produção da própria fábrica.

Os resíduos sólidos que devem ser tidos em consideração são:

- sobras das barras de aço que dão origem aos perfis, pois como os perfis têm comprimentos definidos e múltiplos de 5 *mm*, as partes finais destas barras podem não ser compatíveis com esses comprimentos e, por isso, são consideradas como sucatas;
- limalhas resultantes do processo de corte e da rebarbagem, sendo que estas são encaminhadas para o depósito próprio existente na fábrica.

Existe ainda necessidade de criar um sistema de exaustão de fumos, para que todos os fumos provenientes do processo de soldadura sejam eliminados e não prejudiquem as condições de trabalho na fábrica.

2.3.3 Requisitos de segurança

Além dos requisitos enumerados, há um outro tipo de requisitos de grande importância que deve ser considerado, que são os requisitos de segurança.

Uma vez que operadores da fábrica vão estar na proximidade do equipamento a desenvolver, existem algumas *Diretivas* de segurança que devem ser cumpridas, para que de modo nenhum seja colocada em perigo a saúde dos operadores.

Visto que no equipamento a desenvolver aparentemente não existe necessidade de considerar movimentos com velocidades elevadas, isto é, maiores do que 100 mm/s, a possibilidade de o operador ser confrontado com movimentos inseguros vem diminuída. Sendo assim, deve existir um principal cuidado de segurança em relação à máquina de soldadura, à máquina de corte e à operação de rebarbagem.

2.4 Conclusões

Como se pode verificar, o processo atual é um processo muito moroso, repetitivo e com grande exigência por parte do operador, sendo necessária a sua automatização.

Relativamente aos tempos das etapas do processo de corte de perfis, pode concluir-se que o tempo da etapa de rebarbagem é demasiado longo e que deve ser diminuído substancialmente.

No posto de soldadura, o *setup* inicial é a etapa que ocupa mais tempo e que pode ser compensado, por exemplo, pela colocação de uma única peça que execute as funções de posicionamento necessárias.

Para que as chapas de ventilação sejam produzidas nas devidas condições existem alguns requisitos de processo a cumprir, como por exemplo:

- garantir a qualidade de rebarbagem;
- alinhamento do perfil axialmente relativamente ao dente;
- garantir que este fica bem preso à chapa e não se solte mais tarde durante o funcionamento do motor, pois se isto acontecer nos motores antideflagrantes podia provocar uma explosão do motor, o que é impensável neste tipo de motores.

Além destes requisitos também devem ser tidos em consideração os requisitos ambientais e sobretudo os de segurança, para que a vida e a saúde de nenhum operador seja colocada em risco.

Capítulo 3

Estudo prévio

Tendo em conta a informação exposta no capítulo anterior, é apresentado neste capítulo o estudo prévio de uma solução de princípio, para a automatização de todo o processo de soldadura. Com este estudo pretende-se que haja uma diminuição significativa na exigência humana envolvida e o processo produtivo se torne, portanto, mais rápido, de maior qualidade e maior eficácia.

O estudo prévio tem como principal objetivo definir as principais ideias que servem de base ao desenvolvimento da nova solução automática. Desta forma, é feita inicialmente uma análise crítica dos requisitos apresentados pela WEG formulando os princípios mais importantes que esta solução deve apresentar, para que os requisitos sejam cumpridos.

Posteriormente, é apresentada a solução de princípio onde são expostos e justificados os mecanismos desenvolvidos de modo a cumprir as formulações feitas na secção anterior.

A solução de princípio conta ainda com os primeiros esboços realizados que, de certo modo, ajudaram a clarificar e enquadrar as ideias iniciais e permitir uma avaliação da sua viabilidade.

3.1 Análise dos requisitos apresentados

Tendo em consideração os requisitos apresentados pela WEG foi realizada uma apreciação crítica sobre a sua valorização e quais os capazes de ser incorporados na nova solução produtiva.

Para a realização das várias fases do processo, a solução a desenvolver deverá ser dividida em duas unidades produtivas:

- **unidade automática de corte de barras** em perfis de diferentes tamanhos, com a sucessiva rebarbagem das irregularidades nas faces do perfil resultantes do corte e acondicionamento de perfis para posteriormente serem transportados para a unidade de soldadura;

- **unidade de soldadura automática de perfis**, capaz de receber uma chapa a ser soldada, rodá-la adequadamente para cada posição de soldadura, receber os perfis cortados e colocá-los na posição adequada sobre a chapa para realizar as soldaduras sequenciais por pontos.

A primeira unidade de produtiva será doravante denominada "unidade de corte"e, por semelhança, a segunda será denominada "unidade de soldadura".

3.1.1 Unidade de corte

Em relação à unidade de corte, esta deve incluir:

- um **depósito de barras**, que serão inseridas pelo operador e posteriormente devem ser alimentadas automaticamente para a zona de corte. Sendo as barras a inserir de comprimento bastante grande relativamente à dimensão da sua secção, parece ser adequado propor que elas sejam disponibilizadas em comprimentos de 3 m, em vez dos 6 m, uma vez que estas últimas iriam requerer um espaço de implantação da máquina demasiado grande e criar dificuldades de manobra no ambiente do chão de fábrica;
- um **dispositivo de corte**, que deve envolver um disco de corte apropriado ao corte singular de cada perfil, com grande velocidade de corte. A utilização preferencial do disco em relação ao sistema de corte existente atualmente na WEG (um serrote mecânico) deve-se ao facto de o disco executar um corte com geração de menos rebarbas;
- um **batente posicionador**, deve existir um mecanismo capaz de definir diferentes comprimentos de perfil a cortar, para que assim, sejam cumpridas as necessidades de cada ordem de fabrico relativamente ao comprimento dos perfis. O ajuste deste mecanismo deve ser ponderado se é feito por ajuste manual, ou justifica um posicionamento automático, em virtude da necessidade de rigor e flexibilidade;
- um **dispositivo de rebarbagem** para eliminar as rebarbas das duas superfícies extremas de cada perfil, que deve contar com um mecanismo para rebarbar, uma mó esmeriladora por exemplo, e um mecanismo capaz de fixar o perfil para que sejam eliminadas as rebarbas corretamente sem desalinhamentos do perfil;
- **uma unidade de armazenagem**, no final do processo de rebarbagem, para armazenar os perfis preparados que serão transportados para a soldadura. Deve ainda, incluir a contagem do número de perfis que foram cortados e conhecer o comprimento da barra que falta ser cortada.

Deve ser considerada também, a existência de um depósito capaz de receber quer as sobras de barra quer as aparas resultantes do corte e da rebarbagem.

Relativamente às sobras de perfil a máquina a desenvolver poderá, eventualmente, ser capaz de otimizar o "aproveitamento" dessas sobras, já que uma sobra longa pode corresponder a vários perfis curtos. Assim, com o desenvolvimento a realizar pretende-se que as sobras sejam cortadas em perfis mais pequenos e que apresentem um tamanho *standard*, para que assim a quantidade de material desperdiçado seja menor.

3.1.2 Unidade de soldadura

Relativamente à unidade soldadura, pode definir-se de início que devem existir duas pilhas de chapas, sendo que uma serve de depósito das chapas de entrada, ainda sem perfis soldados, e a outra serve às chapas de saída, já com os perfis soldados.

Para que os perfis sejam soldados à chapa, deve existir uma mesa de soldadura sobre a qual exista um mecanismo que assegure, por um lado, a centragem da chapa e, por outro, o correto posicionamento do dente da chapa em relação aos elétrodos da máquina de soldadura.

A mesa de soldadura, deve por sua vez, possuir capacidade para receber chapas quer de rotor quer de estator, com dimensões muito diferentes e posições angulares de posicionamento dos dentes muito diversas.

A mesa deve apresentar uma reentrância que permitia o acesso dos elétrodos da máquina, para ser possível soldar os perfis nas chapas através de pontos de soldadura.

Consequentemente, o mecanismo que irá rodar a chapa não deverá incluir a rotação da própria mesa pois, nesse caso, a mesa teria tantas reentrâncias quanto o número de dentes das chapas para que os elétrodos da máquina de soldadura pudessem entrar, o que seria uma impossibilidade.

A máquina de soldadura deverá ter capacidade para se movimentar radialmente em relação à mesa para alcançar os diferentes diâmetros e para executar os diferentes pontos de soldadura ao longo do perfil.

Da análise realizada verificou-se que não é necessário que a execução do 1º ponto de soldadura seja junto à extremidade do dente da chapa. Importante, é que o perfil seja mantido fixo, pelo menos, até que o 1º ponto de soldadura esteja concluído.

Os restantes pontos de soldadura no mesmo perfil, podem ser executados logo após o 1º ponto ou, então, serem executados em sequência após todos os primeiros pontos de soldadura terem sido realizados, como acontece no processo manual. No entanto, a execução sequencial de todos os pontos necessários à soldadura de um perfil é claramente uma solução mais eficaz.

Dados os problemas que podem surgir relativamente a uma eventual soldadura defeituosa, ou falsa, é necessário considerar a existência de alguma metodologia para verificar se o perfil ficou efetivamente bem soldado.

Deve ainda ser considerada uma solução de armazenagem para receber os perfis que foram cortados e rebarbados anteriormente na unidade de corte. Se o armazenamento dos perfis no corte for feito de forma a que estes fiquem disponíveis a serem inseridos automaticamente na unidade de soldadura, a eficácia de todo o processo será altamente incrementada.

A metodologia de armazenagem dos perfis deve permitir a receção de uma quantidade suficiente de perfis, que satisfaça a alimentação de perfis para a soldadura de, pelo menos, uma chapa.

A unidade de soldadura deve apresentar uma solução que manipule os perfis desde a zona de armazenagem, onde são disponibilizados até ao local de execução do 1º ponto de soldadura. Além de transportar o perfil, esta solução deve ainda assegurar a fixação do perfil durante a soldadura para que não ocorram desalinhamentos indesejáveis do perfil, em relação ao dente da chapa, decorrentes do próprio processo de soldadura.

Nesta unidade deve existir uma solução de atuação capaz de executar a rotação automática e o posicionamento angular rigoroso da chapa.

Em relação à máquina de corte e de rebarbagem deve existir uma proteção total (sem qualquer acesso permitido) dos seus componentes perigosos, o disco de corte e a ferramenta de rebarbagem.

Por fim, devem ser considerado um sistema de exaustão para eliminar os fumos que são gerados durante da soldadura.

3.2 Apresentação da solução de princípio

Após a análise feita anteriormente, devem ser idealizadas as soluções para levar à prática os requisitos expostos e tornar este projeto real e funcional.

Seguidamente, é exposta a solução de princípio encontrada que apresenta as suas partes principais com as respetivas funcionalidades de modo a ser possível realizar uma avaliação do seu potencial para um ulterior estudo mais detalhado e rigoroso.

3.2.1 Unidade de corte

De uma forma genérica, a unidade de corte é constituída pelos seguintes subconjuntos, para que possa obedecer aos requisitos apresentados:

- **a) depósito** para alojar as barras a cortar;
- **b) alimentador** de barras;
- **c) máquina de corte** de perfis;
- **d) mecanismo de ajuste** do comprimento do perfil;
- **e) máquina de rebarbagem**;
- **f) armazém** de perfis, para transportar para a unidade de soldadura.

Na Figura 3.1 são ilustrados, de uma forma esquemática, os subconjuntos principais da unidade de corte. Porém, os subconjuntos e) e f) não se encontram representados, apenas é identificado o local onde se podem situar.

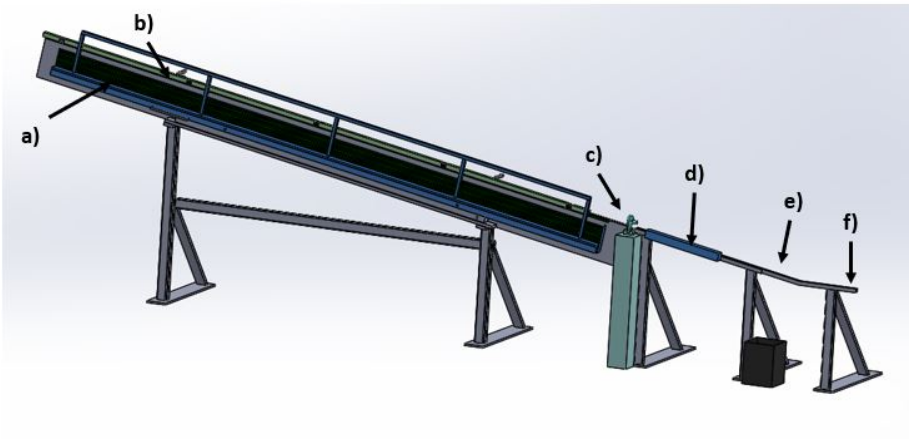


Figura 3.1 - Desenho de princípio da unidade de corte.

O "depósito das barras" serve de armazém às barras, que foram previamente cortadas em comprimentos de 3 *m*, e serão posteriormente cortadas nas dimensões adequadas à soldadura. Esta solução é formada por uma mesa elevatória (Figura 3.2) cuja a posição é incrementada sempre que seja necessário cortar uma nova barra tendo, assim, de elevar 10 *mm* de cada vez. Por sua vez, esta deverá ter capacidade para 10 barras empilhadas.

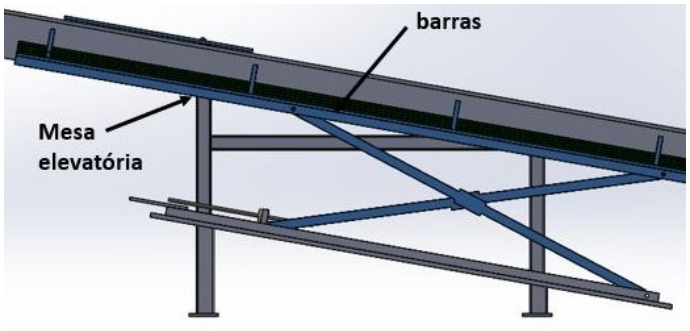


Figura 3.2 - Desenho de princípio da mesa elevatória.

Com esta solução de armazenamento, existe uma autonomia suficiente para cortar 100 perfis de 300 *mm* ou 600 perfis de 50 *mm*.

Esta zona de depósito deve possuir um fácil acesso para que o operador possa inserir facilmente as barras sem estar exposto a qualquer risco de segurança.

A partir do depósito, as barras devem ser alimentadas automaticamente para a zona de corte, através de uma "garra" que apresenta uma configuração adequada para arrastar as barras, como

representado na Figura 3.3. Este movimento de alimentação deve ser assegurado por meios pneumáticos.

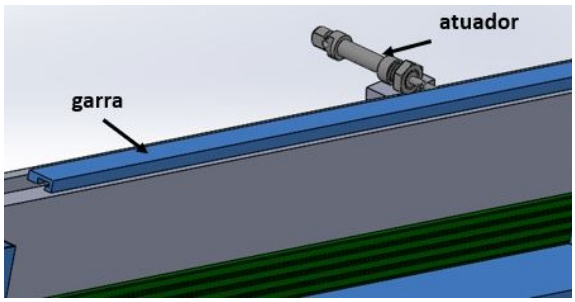


Figura 3.3 - Desenho de princípio do mecanismo de alimentação das barras.

Para que as barras sejam cortadas de forma automática, e sem a necessidade de recorrer a um atuador, a rampa para onde estas são deslocadas possui uma inclinação adequada para que as barras deslizem pelo próprio peso até à zona de corte.

A zona de corte do perfil é constituída por uma máquina de corte com um mecanismo de basculamento. A execução do corte deve ser antecedida da devida fixação (aperto) da barra, por meios pneumáticos, doravante denominados "calcadores", para que durante o corte não haja qualquer movimento do perfil.

O ajuste do comprimento de perfil é executado através de um batente que é antecipadamente ajustado pelo operador e possui um curso máximo de ajuste de 250 *mm*, para conseguir cobrir a gama de comprimentos compreendidos entre 50 e 300 *mm*.

Na Figura 3.4 está representado o desenho de princípio do sistema de corte.

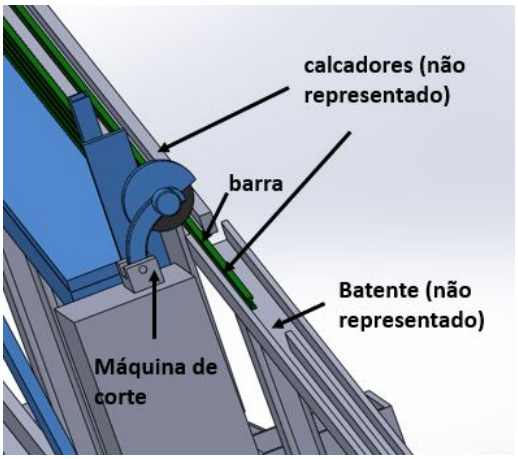


Figura 3.4 - Desenho de princípio do sistema de corte.

Após o corte, o batente que define o comprimento do perfil deve ser elevado para que o perfil passe por baixo e prossiga, ao longo da estrutura inclinada, para a zona de rebarbagem.

Para rebarbar as aparas existentes nas duas faces do perfil poderá ser utilizada uma ferramenta com uma lixa ou, caso se justifique, poderá ser utilizada uma mó de esmeril. Para executar esta operação, a máquina de rebarbagem deve mover-se em relação ao perfil que se terá de encontrar devidamente fixo.

O mecanismo que fixa o perfil deve também permitir rodá-lo, para que este possa ser rebarbado na outra face extrema.

No final de cada processo de rebarbagem, deve ser realizada uma ação de remoção de eventuais limalhas que ficaram agarradas ao perfil com recurso a um sopro de ar, por exemplo.

À medida que os perfis vão ficando finalizados, são inseridos por um atuador pneumático, uns por cima dos outros, em eventuais "cassetes" que permitirão armazenar um número definido de perfis, por exemplo 30 perfis, que depois poderão ser transportados manualmente, ou automaticamente, para a unidade de soldadura.

As "cassetes" devem ser ajustáveis para permitir o armazenamento de perfis com diferentes comprimentos na mesma cassete, sem necessidade de fabrico de uma cassete para cada comprimento de perfil predefinido.

A Figura 3.5 ilustra as cassetes que servem de alojamento aos perfis.

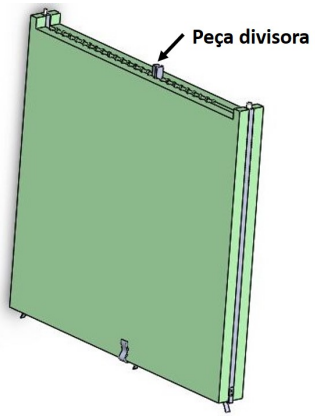


Figura 3.5 - Desenho de princípio das cassetes.

Para que após a inserção dos perfis estes não caiam devido à força de gravidade, devem ser executadas umas peças retentoras dos perfis que realizam a função de uma mola, como se pode ver na Figura 3.6.

Para contar o número de perfis inseridos na cassete, recorre-se a um contador que irá incrementar o movimento do atuador que insere os perfis na cassete.

Na unidade de corte deve ainda existir um depósito capaz de receber as sobras das barras e um outro depósito para as limalhas oriundas do corte e da rebarbagem.

As sobras que são reaproveitadas em perfis de comprimento *standard* executam a sequência

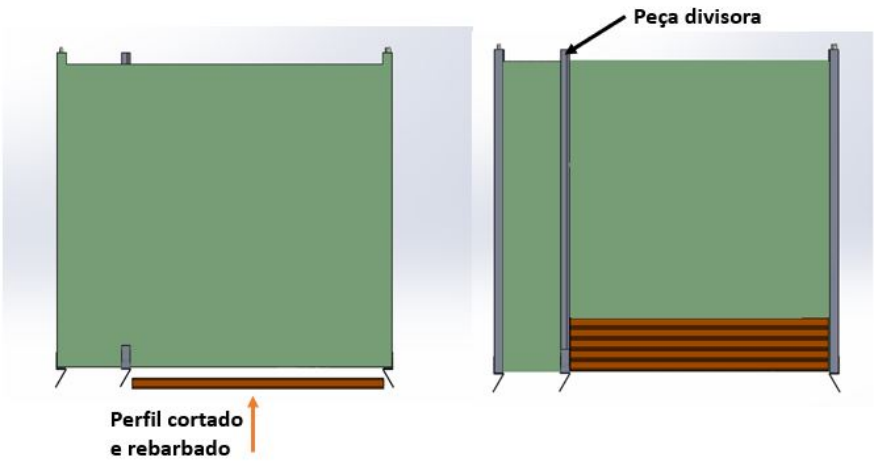


Figura 3.6 - Inserção dos perfis nas cassetes.

normal de preparação de perfis, mas no final são direcionadas para um depósito diferente em vez de serem inseridas nas cassetes.

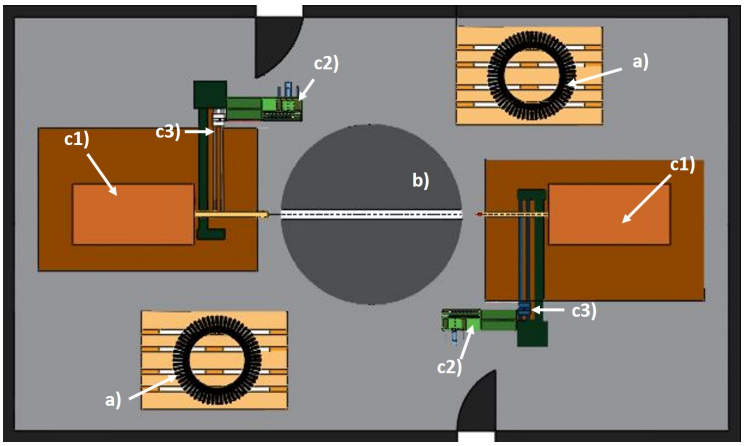
3.2.2 Unidade de soldadura

O processo de soldadura será constituído principalmente pelos seguintes elementos, que se encontram representados na Figura 3.7a e na Figura 3.7b, na qual os componentes apresentam um maior detalhe.

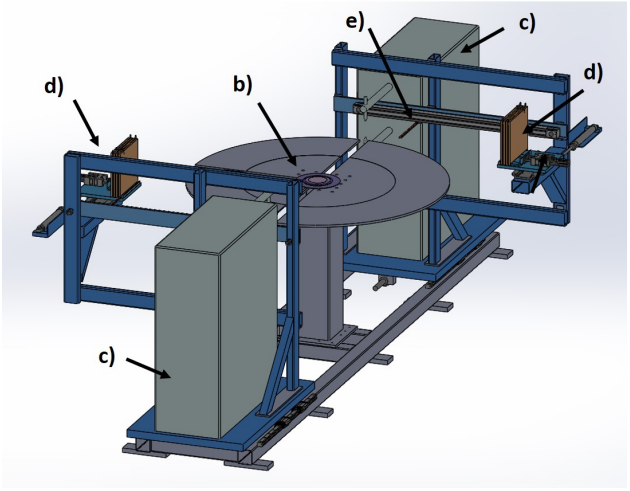
- **a) pilha de chapas** em curso de produção;
- **b) mesa de soldadura**;
- **c) conjunto de soldadura** por pontos (duas máquinas):
  - c1) **máquina de soldadura**;
  - c1) **dispensador perfis**;
  - c1) **manipulador de perfis** para soldadura.

Uma vez que o processo de soldadura corresponde à fase produtiva de maior consumo de tempo, a duplicação da capacidade de soldadura pode aumentar decisivamente a produtividade da máquina em estudo. Desta forma, o projeto em desenvolvimento tem em consideração a capacidade para incorporar duas máquinas de soldadura por pontos, frente a frente a executar a operação de soldadura, e cada uma possuir o respetivo dispensador e manipulador de perfis. Contudo, nada impossibilita a colocação de apenas de um conjunto de soldadura.

O processo de soldadura possui dois locais destinados à colocação de chapas que devem ser de fácil acesso, uma vez, que as chapas são colocadas sobre paletes que serão transportadas por empilhadores, ou porta paletes.



(a) Desenho de 2D da unidade de soldadura.



(b) Desenho em 3D da unidade de soldadura.

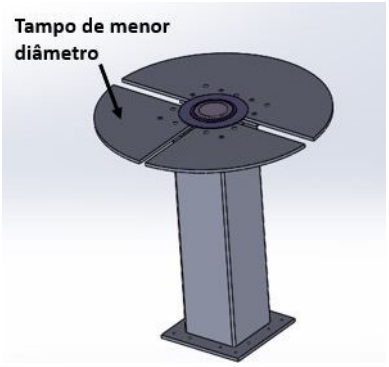
Figura 3.7 - Desenho de princípio da unidade de soldadura.

Dada a existência de diferentes ordens de fabrico, as chapas devem ser movidas das pilhas para a mesa, ou vice-versa, de forma manual pelo operador, pois não aparenta justificar-se de momento a consideração de um mecanismo robotizado que cumpra os requisitos de alimentação dos diferentes tamanhos chapa e para tão variáveis, e eventualmente singulares, ordens de fabrico.

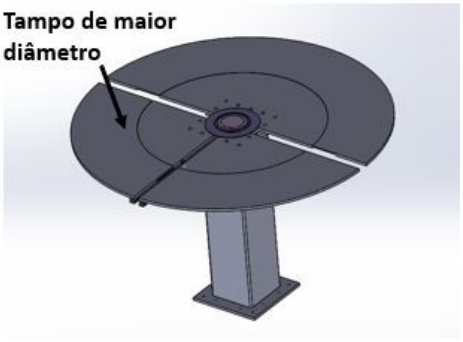
A mesa de soldadura onde são colocadas as chapas, encontra-se numa posição central e fixa, sendo a máquina de soldadura a mover-se automaticamente em relação a esta. O curso deste movimento deve ser cerca de 750 *mm* para que sejam cumpridos os requisitos dimensionais.

Como referido anteriormente no estudo prévio, a mesa possui uma reentrância por onde irão trabalhar os elétrodos para soldar os perfis às chapas. Contudo, para evitar que os elétrodos da máquina de soldadura sejam demasiado compridos para conseguir alcançar diâmetros de soldadura menores, a mesa deve possuir dois tampos. O tampo de maior diâmetro é removível, como se pode verificar na Figura 3.8.

A mesa de soldadura deve compreender um mecanismo que rode a chapa para a próxima



(a) Solução proposta de mesa de soldadura com tampo menor.



(b) Mesa de soldadura com tampo maior.

Figura 3.8 - Desenho de princípio da mesa de soldadura.

execução de soldadura. Este mecanismo consiste num rolo de atrito, que tem acoplado um pequeno motor, e que é colocado sobre a chapa e devido ao atrito permite rodá-la.

A Figura 3.9 representa a peça de centragem que tem como objetivo garantir a centragem das chapas em relação à mesa de soldadura. Como estes elementos dependem do diâmetro interno das chapas, existe a necessidade de fabrico de uma peça para cada diâmetro interno.

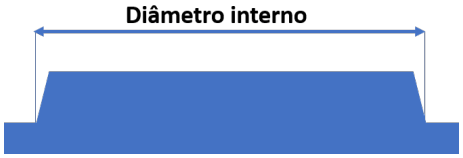


Figura 3.9 - Desenho de princípio da peça de centragem.

O local onde serão colocadas as cassetes que contêm os perfis vindos do processo de corte designa-se por “dispensador” de perfis.

Para que seja garantida a alimentação suficiente de perfis para, pelo menos, uma chapa, são consideradas a colocação de duas cassetes, lado a lado, como representado na Figura 3.10. Estas, por sua vez, são colocadas invertidas em relação à posição que tinham no seu carregamento na unidade de corte de perfis.

As cassetes são posicionadas, na mesa de alimentação, por dois pinos com diâmetros diferentes para que estas não sejam colocadas numa posição errada.

Para ser possível distinguir as cassetes optou-se por denominá-las por "cassete principal" e "cassete auxiliar". Normalmente, a cassete que irá alimentar os perfis é a "principal", pois é a de mais fácil e rápido acesso, sendo que a "cassete auxiliar" irá necessitar de ser utilizada somente quando a "cassete principal" não tiver perfis, ou não estiver instalada (ativa).

Os perfis caem das cassetes por gravidade e é utilizado um atuador pneumático, "atuador

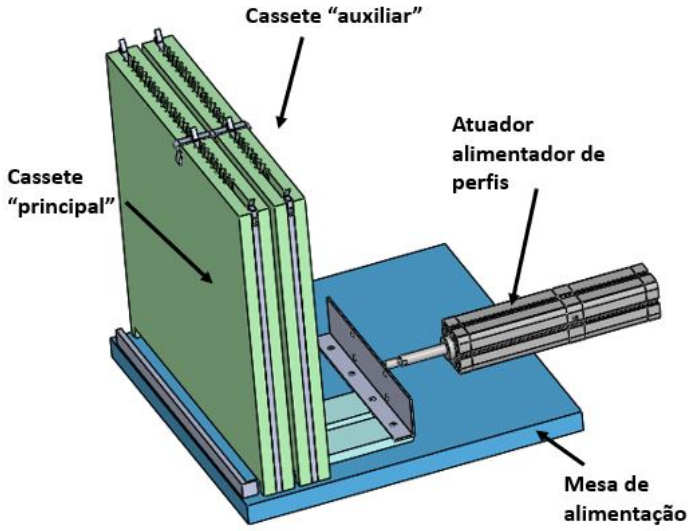


Figura 3.10 - Desenho de princípio do dispensador de perfis.

alimentador", para os empurrar sobre a mesa de alimentação. Quando o atuador recua o próximo perfil cai por gravidade e é seguidamente empurrado pelo atuador.

Com esta solução, é possível automatizar o processo de alimentação dos perfis e aumentar o número de perfis armazenados e, com isto, diminuir as vezes que o operador tem de carregar o depósito de perfis.

Na Figura 3.11 é apresentado um esquema que tem como objetivo clarificar o processo descrito anteriormente.

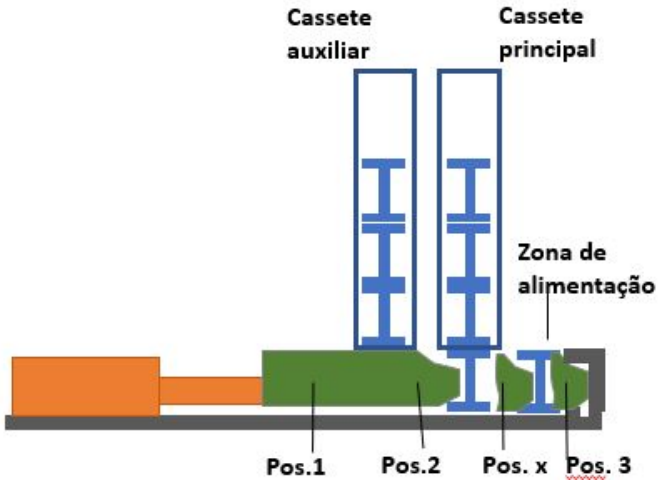


Figura 3.11 - Esquema representativo da alimentação de perfis.

O atuador utilizado é um atuador pneumático de três posições, uma vez, que este se irá mover entre as posições 1, 2 e 3, para considerar a alimentação de perfis a partir das duas cassetes:

- A **posição "1"** é a posição de "recuo total" para permitir a queda de um perfil da cassete auxiliar e para que logo de seguida, este seja empurrado para a posição final de alimentação. Esta posição só é utilizada caso a cassete principal não esteja ativa ou esteja sem perfis;
- A **posição "2"** é a posição de "recuo normal" para permitir a queda de um perfil da cassete principal e para que, de seguida, este seja empurrado para a posição final de alimentação. Esta posição de recuo é aquela que deverá ser utilizada sempre que a cassete principal esteja "ativa", isto é, inserida na mesa de alimentação;
- A **posição "3"** é a posição de avanço máximo do atuador. Quando esta posição é atingida significa que nenhum perfil se encontra no caminho e, portanto, corresponde a uma situação de falha no transporte do perfil.

As peças que empurram o perfil, designados por "machos", encontram-se na parte da frente do "atuador alimentador". Estes foram desenhados de forma a impedir que os perfis que estão nas cassetes não caiam quando estiver a ser empurrado um perfil e, por outro lado, para que o perfil seja empurrado pela sua alma, de modo a que não vire. O facto de existirem dois machos permite que se exerça um movimento paralelo do perfil, para diferentes comprimentos do mesmo.

A mesa de alimentação deve possuir um fácil acesso para que o operador possa colocar as cassetes quando o processo está a decorrer sem que seja colocado em perigo (se isto for de todo necessário).

Depois do perfil ser empurrado para a posição "*x*", este deve ser transportado automaticamente até ao local de execução da soldadura sobre a chapa sendo utilizado para tal um "manipulador de perfis".

Este manipulador de perfis é constituído por uma carruagem, acionada por uma correia, e por uma "forqueta", como representado na Figura 3.12, que irá pegar no perfil e transportá-lo. Além disso, a forqueta tem a função de fixar o perfil durante a execução dos pontos de soldadura para evitar desalinhamentos do perfil.

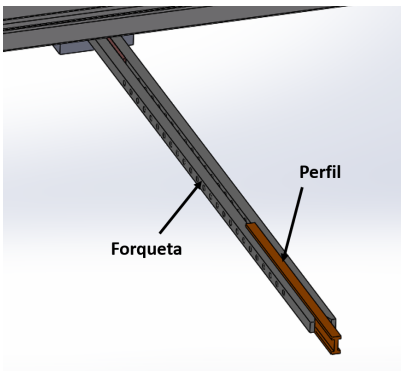


Figura 3.12 - Proposta de forqueta para o transporte do perfil até à chapa.

A forqueta possui vários furos onde poderá ser inserida uma peça que serve de batente ajustado ao comprimento do perfil.

Para o perfil ser inserido na forqueta, a mesa de alimentação do dispensador tem que se mover em direção à forqueta que já se deve encontrar devidamente alinhada com o perfil. Os chanfros existentes na extremidade da forqueta permitem uma melhor inserção deste.

O facto de existirem diferentes diâmetros internos e externos implica que o primeiro ponto de soldadura apresente um posicionamento diferente de chapa para chapa. Desta maneira, para que o movimento desde a zona de alimentação do perfil até à execução do 1º ponto de soldadura seja constante e independentemente do diâmetro da chapa, o dispensador e o manipulador de perfis devem-se mover em simultâneo com a máquina de soldadura, o que permite que tanto a posição de início da forqueta, como a posição final, sejam sempre fixas.

A Figura 3.13 ilustra os movimentos da unidade de soldadura: o movimento da mesa de alimentação para inserir o perfil na forqueta, com uma seta amarela, o movimento horizontal da forqueta para transportar o perfil, a vermelho, e o movimento da máquina de soldadura para executar os diferentes pontos de soldadura ao longo do perfil, com uma seta azul. É ainda possível visualizar a estrutura que suporta estes 3 mecanismos.

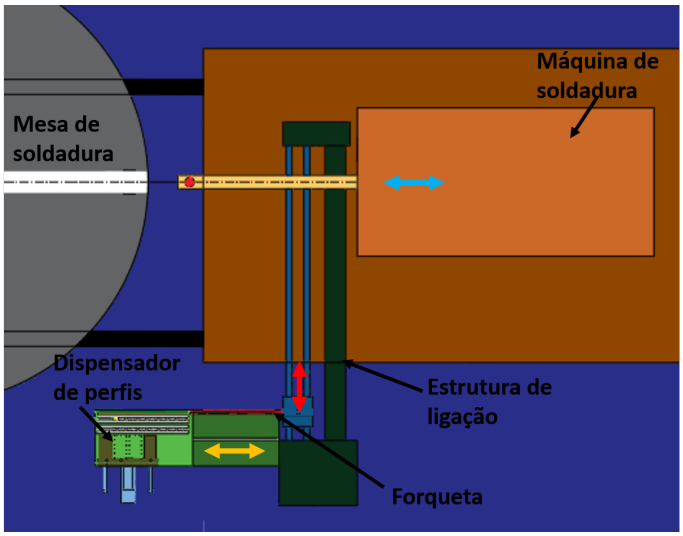


Figura 3.13 - Proposta dos movimentos principais da unidade de soldadura.

O movimento da máquina soldadura, para execução dos vários pontos de soldadura e para se ajustar ao diâmetro da chapa, é executado por um fuso, acionado por um servomotor, para que seja sempre conhecida a posição de soldadura e, assim, controlar o posicionamento do perfil.

Independentemente do tipo de chapas o 1º ponto de soldadura a ser executado é sempre o ponto localizado no menor diâmetro. Deste modo, a máquina de soldadura é posicionada inicialmente nesta posição, e para executar os restantes pontos realiza sempre um movimento de recuo.

Efetivamente, como a forqueta se move em conjunto com a máquina de soldadura à medida

que a máquina recua, a forqueta vai deslizando progressivamente, relativamente, ao perfil que já se encontra fixo pelo 1º ponto de soldadura. Na execução do último ponto esta já se deve encontrar livre do perfil e deve movimentar-se para transportar o próximo perfil a soldar.

Para a verificação da qualidade ponto de soldadura é empregue um atuador pneumático que empurra forqueta contra o perfil após a execução do primeiro ponto. No caso de o atuador chegar ao fim do seu pequeno curso, é porque o perfil se soltou da chapa, logo a soldadura é considerada mal executada.

A "hotte" do sistema de exaustão será montada na vertical às máquinas de soldadura, para remover os gases gerados no processo de soldadura.

A máquina de soldadura deve conter barreiras de segurança em todo o seu redor, pois é considerado um equipamento perigoso uma vez que o operador pode colocar a mão entre os elétrodos ou até mesmo ser atingido por partículas incandescentes que são libertadas durante a execução de cada ponto de soldadura.

3.3 Conclusões

Nesta solução de princípio existe necessidade de recorrer ao operador para que sejam realizadas algumas funções básicas como:

- a inserção de barras no depósito de corte;
- o transporte das cassetes com os perfis preparados desde a unidade de corte até a unidade de soldadura;
- colocação das chapas de reforço sobre a mesa de soldadura;
- remoção das chapas de reforço da mesa de soldadura.

Contudo, o nível de exigência do operador em relação a estas operações é muito menor que do que no processo atual da empresa.

Após a realização dos primeiros desenhos e da definição das ideias chave foi realizada uma primeira apresentação na WEG. Esta apresentação inicial teve como objetivo averiguar se a solução de princípio cumpre o que é pretendido e, desta forma, perceber se os requisitos foram analisados corretamente.

Foram levantadas algumas questões sobre a robustez mecânica de alguns subconjuntos, nomeadamente da forqueta.

O próprio movimento de soldadura também suscitou algumas dúvidas pela eventual inércia associada à máquina de soldadura, devendo ser estudado o tipo específico de máquina de soldadura que mais se adequa a esta solução.

Verificou-se ainda que o processo de rotação das chapas com recurso ao rolo não pode ser aplicado, pois com a execução da soldadura dos perfis estes passam a impedir o adequado assento do rolo sobre a chapa.

Por fim, deve ser considerada a inserção de uma balança no depósito das sobras para apurar a massa de material desperdiçado.

Capítulo 4

Apresentação da solução de construção

Após a estruturação da solução de princípio, onde foram estabelecidas as ideias de funcionamento mais importantes, prosseguiu-se para a etapa seguinte: o desenho da solução de construção recorrendo ao programa *SolidWorks*.

Como é expectável a solução apresentada não foi obtida de imediato, pois existiram várias etapas de progresso onde foram testadas e repensadas várias soluções.

De seguida, serão expostas as soluções desenvolvidas, para a "unidade de corte" e para a "unidade de soldadura".

Para que exista uma melhor compreensão da solução, cada unidade de produção será tratada em subconjuntos funcionais, isto é, os subconjuntos funcionalmente de maior importância no desenvolvimento desta solução.

4.1 Unidade de corte

Como já referido anteriormente, a unidade de corte tem os seguintes objetivos: a preparação de perfis, pressupondo o corte de barras de 6 *m* em parcelas de 3 *m*, seguindo-se o corte em comprimentos definidos, a rebarbagem das superfícies extremas, removendo eventuais aparas e a inserção dos perfis em cassetes, de modo a estarem em condições de ser transportadas para a unidade de soldadura.

Desta maneira, podem-se salientar os principais subconjuntos funcionais da unidade de corte:

- **a)** estrutura base;
- **b)** sistema de alimentação de barras;
- **c)** ajuste automático do comprimento do perfil;
- **d**) dispositivo de corte;
  - **d1)** calcadores;

  - **d2)** máquina de corte;

- **e)** solução de rebarbagem:

  - **e1)** 1º dispositivo de rebarbagem;
  - **e2)** 2º dispositivo de rebarbagem;

- **f)** armazenagem de perfis;
- **h)** conjuntos auxiliares.

A Figura 4.1 apresenta os subconjuntos funcionais mais importantes que serão descritos de seguida.

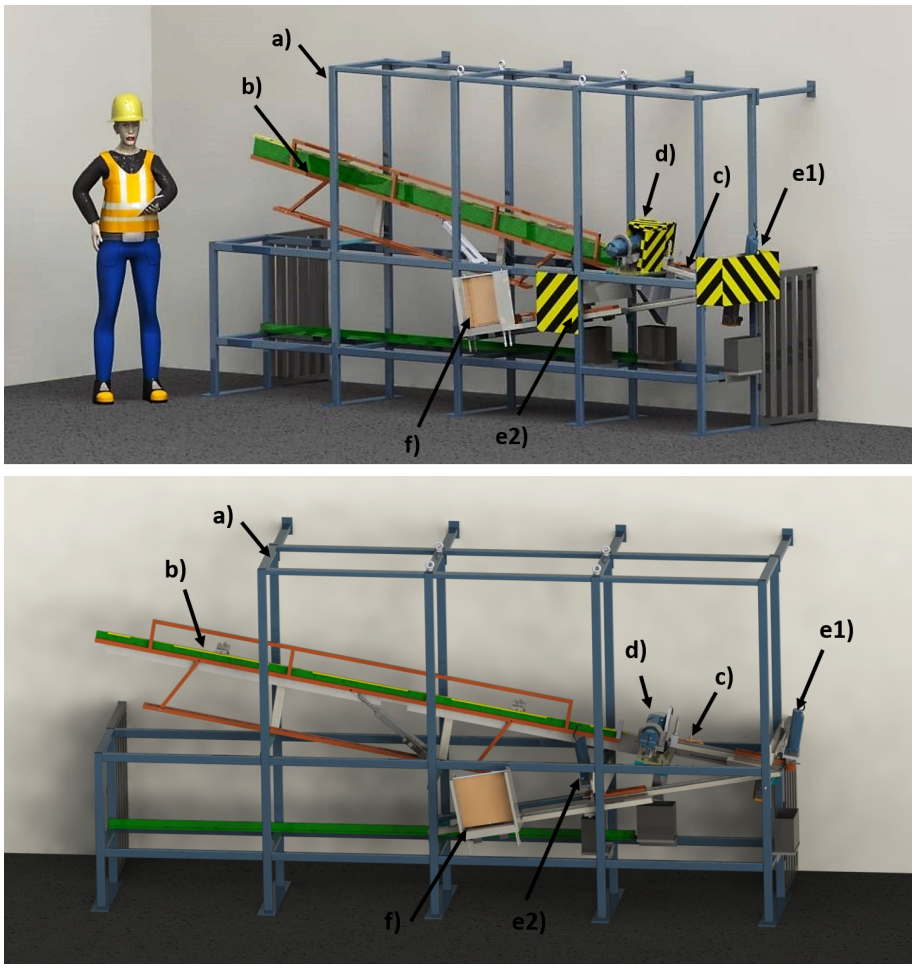
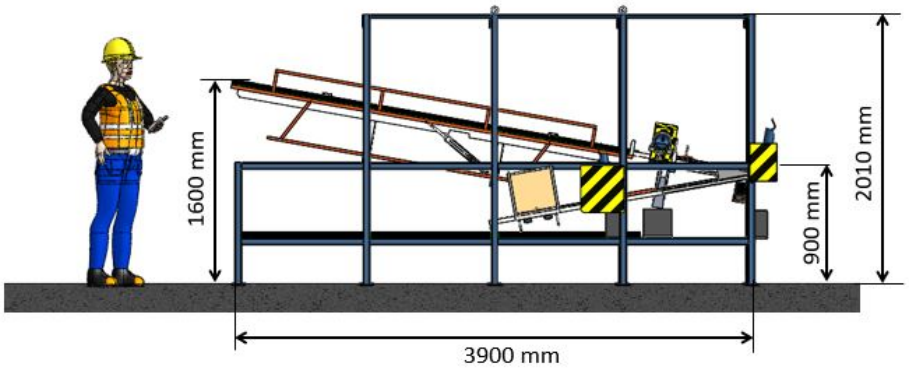
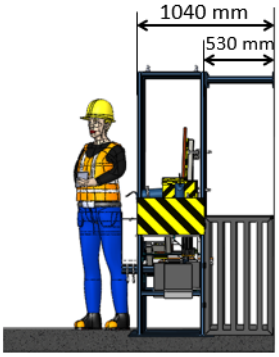


Figura 4.1 - Subconjuntos da unidade de corte.

As dimensões globais da "unidade de corte" estão representadas na Figura 4.2.



(a) Vista central.



(b) Vista lateral.

Figura 4.2 - Dimensões globais da unidade de corte.

4.1.1 Estrutura base da unidade de corte

Como o próprio nome indica, este conjunto representa a estrutura base de toda a unidade de corte, isto é, onde todos os mecanismos estão inseridos e sustentados. Esta está representada na Figura 4.3 no pressuposto de esta ser instalada junto a uma parede de suporte, dada a sua elevada altura, para a dimensão da sua profundidade.

Este conjunto é formado essencialmente por perfis tubulares retangulares, de aço com costura, de dimensão 50×30 *mm* que são soldados entre si.

Esta estrutura é fixa a uma parede de fundo por uns braços (Figura 4.4) que são aparafusados à estrutura e à parede permitindo uma estabilidade plena à estrutura.

A distância entre a parede e a máquina deve ser superior a 500 *mm*, para que os requisitos em relação à distância de segurança da norma *ISO 3854* [11] sejam cumpridos. Relativamente à altura deste espaço, é de cerca de 2 *m*, garantindo que o operador se consegue movimentar com facilidade neste espaço, de acordo com a mesma norma.

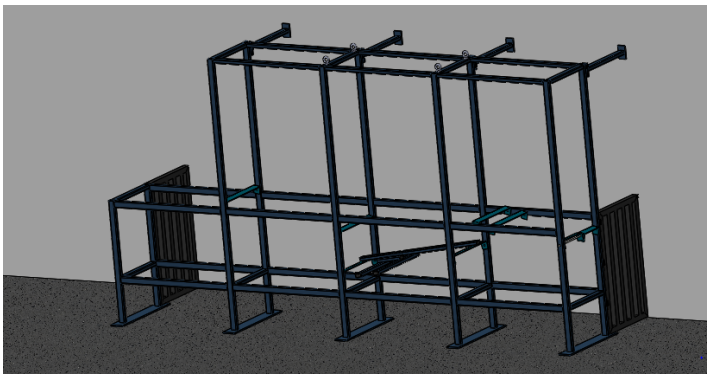


Figura 4.3 - Estrutura base da unidade de corte.

Figura 4.4 - Detalhe de fixação estrutural e suspensão da estrutura base da unidade de corte.

Para impedir o acesso livre ao espaço entre a parede e a máquina de soldadura, são colocadas portas que só devem permitir o acesso a esta zona quando a máquina se encontrar inoperacional.

Este conjunto, possui ainda, na sua parte superior uns olhais M16, soldados, que permitem transportar a máquina para outro local, como se pode observar na Figura 4.4.

Para que os perfis sejam movimentados, foram previstas umas rampas de descida que direcionam o perfil entre os diferentes subconjuntos funcionais da unidade de corte, e que se encontram representadas na Figura 4.5.

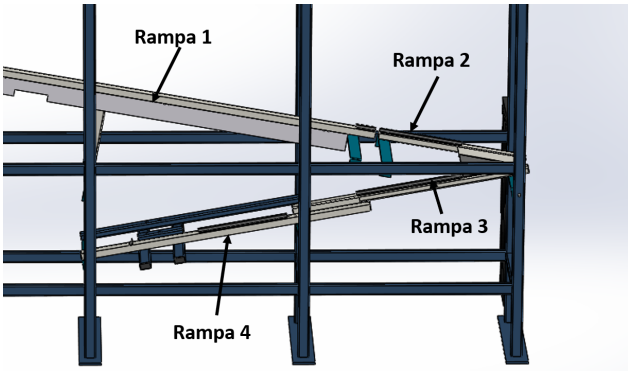


Figura 4.5 - Posição das rampas de descida relativamente à estrutura base.

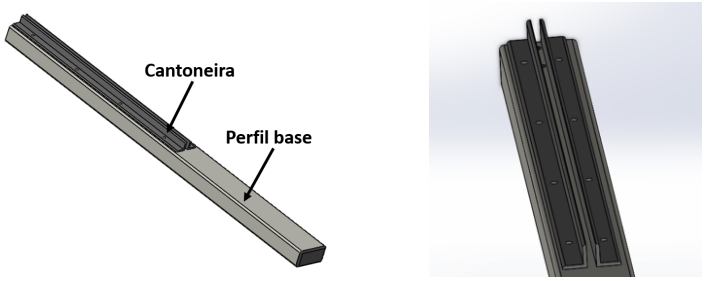
As rampas de descida têm as seguintes funções:

- **rampa 1**: transporte da barra desde a "estação de alimentação" das barras até à "estação de corte";
- **rampa 2**: transporte do perfil desde a "estação de corte" até à primeira "estação de rebarbagem";
- **rampa 3**: transporte do perfil desde a primeira "estação de rebarbagem" até à segunda "estação de rebarbagem";
- **rampa 4**: transporte do perfil desde a segunda "estação de rebarbagem" até à "estação de armazenamento de perfis" nas cassetes.

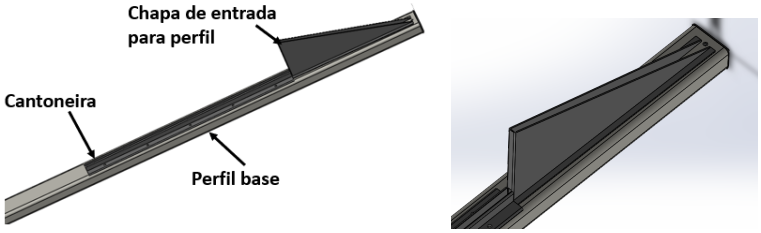
Como já referido, estas rampas têm uma inclinação suficiente para que os perfis se desloquem devido ao próprio peso sem necessidade de implementação de um sistema ativo de movimentação de perfis.

As rampas de descida são constituídas por tubos de aço, igual aos tubos da estrutura base, e por umas cantoneiras de abas iguais que aparafusadas aos tubos formando umas calhas de 6 *mm* de largura por onde os perfis devem passar. No início de cada rampa de descida, as cantoneiras encontram-se ligeiramente mais afastadas para que o perfil possa ser guiado no movimento de descida com mais facilidade.

Na Figura 4.6 está representada a rampa 2 e a rampa 3. As restantes rampas, a rampa 1 e a rampa 4, apresentam uma configuração semelhante à rampa 2 e por isso não são apresentadas.



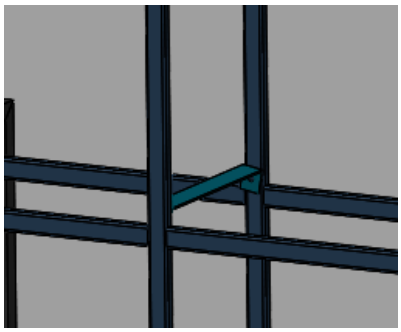
(a) Rampa 2.



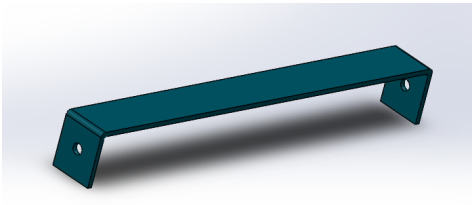
(b) Rampa 3.

Figura 4.6 - Representação das rampas de descida dos perfis.

Para fixar as rampas de descida à estrutura base existem uns suportes apropriados que são aparafusados à estrutura base (Figura 4.7) e permitem que a inclinação das rampas de descida possa vir a ser afinada, caso necessário.



(a) Suporte das rampas de descida inserido na estrutura base.



(b) Suporte das calhas de descida.

Figura 4.7 - Exemplificação do suporte das rampas de descida.

Na extremidade da estrutura, é colocado um varão que oferece rigidez na união de dois suportes para as rampas 2 e 3 relativamente à estrutura base, como é possível ver na Figura 4.8.

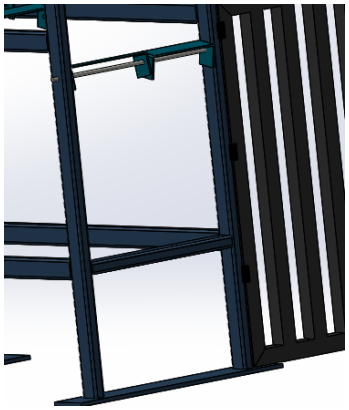


Figura 4.8 - Ilustração do varão que articula os suportes das rampas 2 e 3.

Esta estrutura dispõe de um suporte apropriado para alojar o conjunto relacionado com a inserção dos perfis nas cassetes. Este suporte, com perfis tubulares iguais aos da estrutura base, encontra-se fixo ao perfil da rampa 4 e a outro perfil auxiliar, como representado na Figura 4.9.

Por fim, esta estrutura permite armazenar algumas barras de 3 *m* na zona inferior, como se pode verificar na Figura 4.10, que constitui um pequeno depósito de barras que facilita a inserção destas, pelo operador, na mesa elevatória.

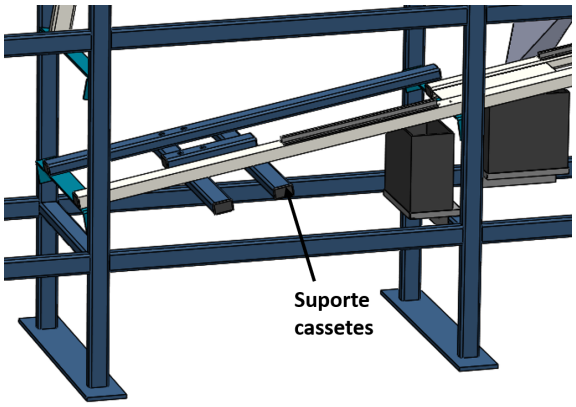


Figura 4.9 - Ilustração do suporte para alojamento do conjunto das cassetes.

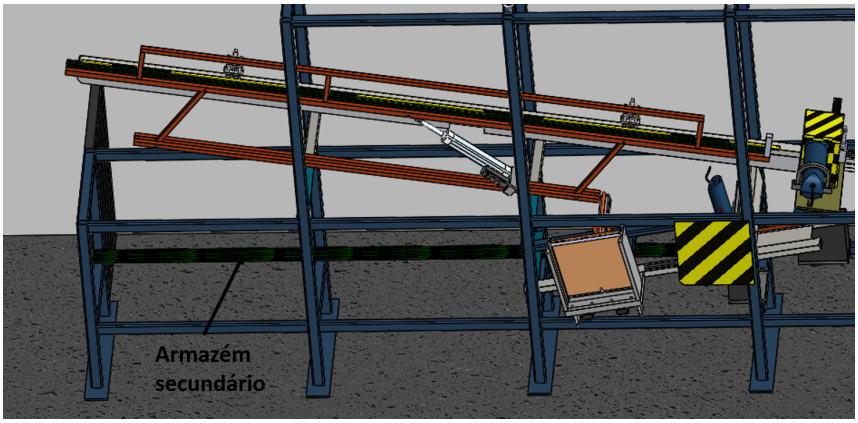


Figura 4.10 - Ilustração do armazém auxiliar para barras.

4.1.2 Sistema de alimentação de barras

Este conjunto tem como objetivo alimentar automaticamente as barras, previamente colocadas manualmente sobre a mesa elevatória, e que dá início ao processo de alimentação de barras na rampa 1 de alimentação para o corte.

Este subconjunto é constituído sobretudo por uma mesa elevatória, onde se encontra o conjunto de barras empilhadas, e por uma garra com uma configuração adequada à movimentação transversal da barra.

A mesa elevatória serve de depósito até 10 barras de 3 *m* e deve elevar-se incrementalmente da dimensão da altura de uma barra à medida que é necessário alimentar uma barra. Sendo assim, deve possuir um curso vertical superior a 100 *mm* (o que se traduz num curso efetivo do atuador maior, uma vez que este se encontra inclinado).

O movimento de elevação é executado por um atuador elétrico, com acionamento de um fuso

interior, até atingir a movimentação incremental desejada. Este deve possuir as características apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características do movimento elevatório.

Características	
Solução construtiva	motor + fuso
Energia	elétrica
Tamanho do atuador	32 *mm*
Passo do fuso	5 *mm*
Curso	200 *mm*
Forca máxima	600 *N*
Velocidade de referência	10 mm/s
Tempo de mov. de 20 *mm*	1 *s*

Para obter a melhor relação entre a posição do atuador e mesa elevatória, executou-se um esquema para analisar as melhores combinações possíveis. Esta análise está exposta no Anexo A.1.

Nesta solução, é incorporado um sensor indutivo ($S1$), representado na Figura 4.11, que permite detetar quando a barra está na posição correta, durante o movimento de elevação, para ser arrastada.

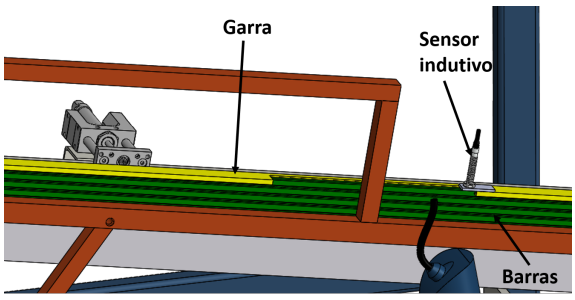
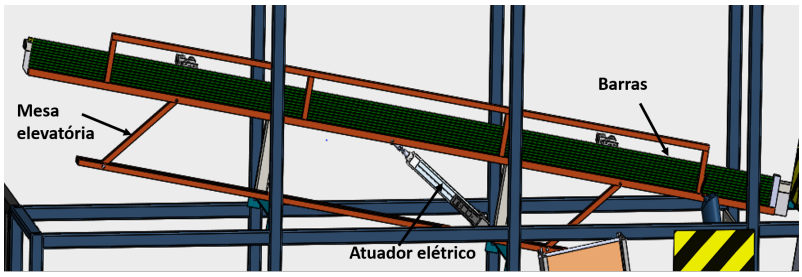


Figura 4.11 - Sensor indutivo ($S1$) para detetar barras na mesa elevatória.

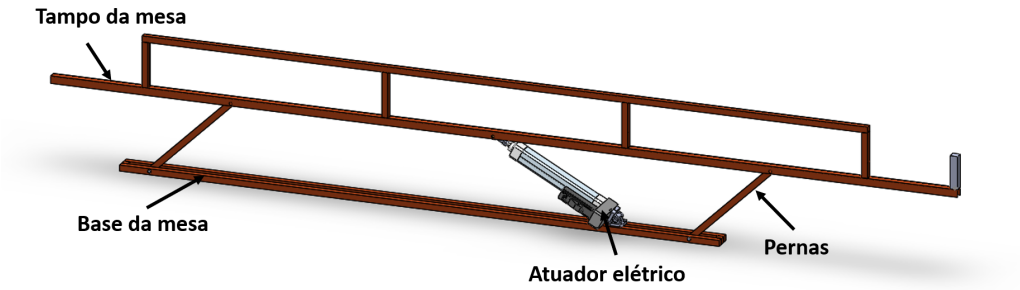
Apesar de a mesa elevatória apresentar um comprimento muito grande, apresenta um tampo com uma largura pequena, cerca de 25 *mm*, onde estão dispostos uns perfis tubulares de 20×20 *mm* que servem de guia vertical para as barras que são inseridas pelo operador. A base da mesa também é constituída por perfis da mesma secção.

Para que as barras sejam colocadas corretamente, o espaço que lhe é disponibilizado não permite que sejam colocadas na horizontal, isto é, têm de ficar sempre orientadas com a alma do perfil na vertical.

Na Figura 4.12 é representada a mesa elevatória com os principais componentes.



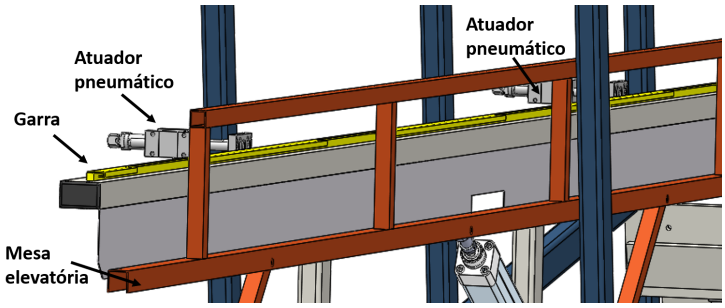
(a) Vista global.



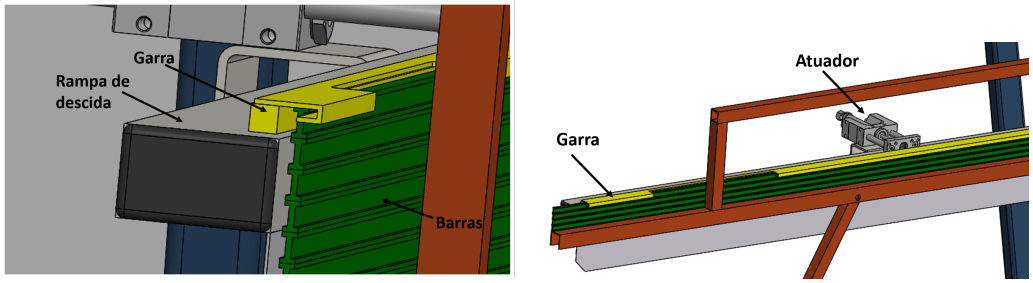
(b) Detalhe da mesa elevatória.

Figura 4.12 - Mesa elevatória.

Para retirar as barras da mesa elevatória para a rampa de alimentação que dá origem ao corte (rampa 1), recorre-se a uma garra, constituída por perfis especiais em alumínio, que abrange quase todo o comprimento da barra e que a transporta para a rampa. A garra e os respetivos atuadores pneumáticos associados estão representados na Figura 4.13.



(a) Vista global.



(b) Detalhe da garra de alimentação.

Figura 4.13 - Garra de alimentação das barras.

Os dois atuadores pneumáticos utilizados para arrastar as barras devem apresentar as características nominais da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características dos atuadores para o arrasto das barras.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	16 *mm*
Curso	30 *mm*
Força de avanço	121 *N*
Força de recuo (arrasto)	104 *N*
Velocidade de referência	20 mm/s
Tempo de ciclo	3 *s*

Como a rampa de alimentação para o corte é inclinada e existe folga entre a garra e a barra, quando esta última é transportada para a rampa começa imediatamente a descer apenas com o seu próprio peso, até encontrar um batente móvel (batente móvel 1), imediatamente antes da estação de corte.

Este 1º batente móvel, designado mais a frente por 1ª calcador, irá apresentar duas funções, servir de 1º batente e calcar a barra durante o corte. Para permitir que a barra prossiga para a estação de corte, este apresenta um movimento vertical.

Deve ser salientado que existe ainda uma chapa de encosto entre a mesa elevatória e a rampa de descida que impede que as barras caiam durante o movimento de elevação da mesa.

4.1.3 Sistema de ajuste automático do comprimento do perfil

O sistema de ajuste automático do comprimento de perfil apresenta 2 funções: servir de 2º batente móvel (batente móvel 2) e definir o comprimento do perfil.

Para realizar a primeira função, o batente, que não é mais do que uma pequena barra de alumínio, é roscado na haste de um atuador pneumático.

Quando este atuador se encontra na sua posição avançada, serve de batente e trava o movimento de descida da barra. Após o corte, na sua posição mais elevada, deixa passar o perfil por baixo do batente até à próxima estação de trabalho, a rebarbagem.

O atuador pneumático deve-se apresentar normalmente na posição avançada e a pressionar o batente contra a rampa de descida, para garantir que a barra não desça para além do batente, no caso de falha de energia. As características do atuador responsável pela elevação são apresentadas na Tabela 4.3.

Para realizar o ajuste do comprimento específico dos perfis que são cortados, este batente apresenta então um segundo movimento, agora de translação, que se ajusta em função do comprimento

Tabela 4.3 - Características do atuador de elevação do batente que define o comprimento do perfil.

Características	
Solução construtiva	simples efeito normalmente avançado
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	8 *mm*
Curso	25 *mm*
Força de recuo	24 *N*
Velocidade de referência	50 mm/s
Tempo de mov. (*mm*)	0,5 *s*

do perfil a cortar.

Para este efeito, é utilizado um eixo linear elétrico, de correia, que transporta na sua carruagem o batente e o atuador pneumático que realiza a primeira função. Este eixo linear constitui um posicionador automático do batente que permite definir a correta dimensão do comprimento do perfil sem necessidade da ação do operador.

O eixo linear e o batente estão representados na Figura 4.14.

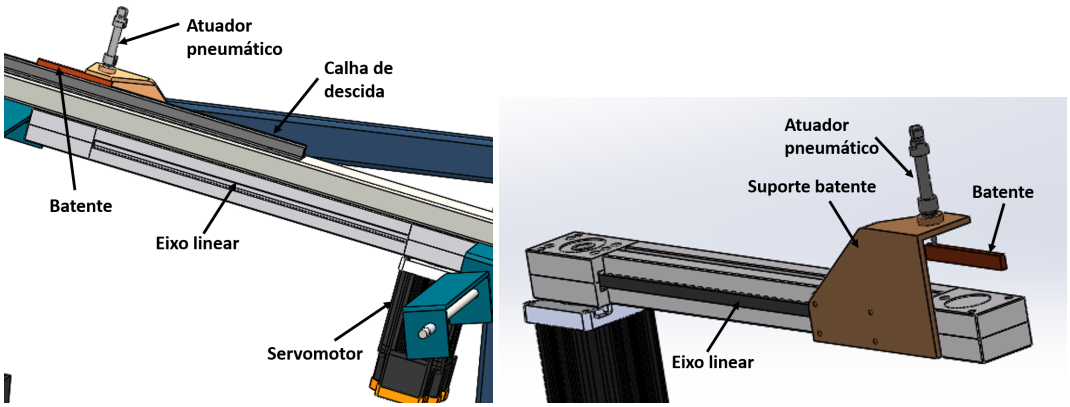


Figura 4.14 - Sistema de ajuste do comprimento do perfil.

O atuador pneumático deve ser roscado num casquilho que está preso ao suporte do batente por um anel elástico. Esta solução permite interligar as duas funções do batente e minimizar os esforços que o suporte do batente terá de suportar.

4.1.4 Dispositivo de corte

Este conjunto destina-se a cortar as barras em perfis com o devido comprimento e é constituído por uma máquina de corte, com o respetivo suporte e o meio de movimentação em articulação, e os calcadores pneumáticos de fixação do perfil para o corte.

Os calcadores apresentam duas funções nesta unidade de corte:

- servir de 1º batente ao movimento de descida da barra;
- fixar a barra durante o corte.

Para realizar ambas as funções os calcadores possuem um atuador pneumático de duplo efeito.

Para realizar a primeira função o atuador pneumático deve-se encontrar na sua posição mais avançada, realizando assim a função de batente travando o movimento de descida. Na sua posição mais recuada, deixa passar livremente a barra para que esta continue o movimento de descida.

A função de fixar as barras permite que o corte seja executado corretamente, sem a ocorrência de movimentos indesejáveis do perfil, sendo que, neste momento, os calcadores devem-se encontrar avançados.

Estes calcadores encontram-se representados na Figura 4.15.

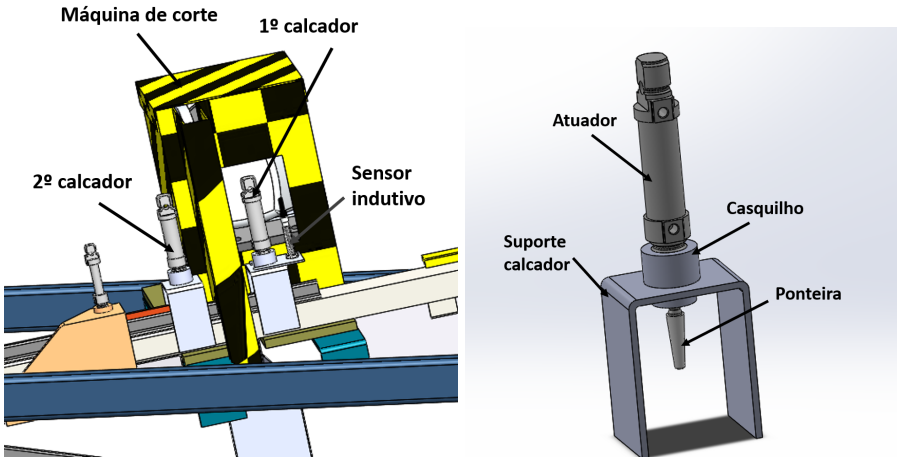


Figura 4.15 - Calcadores de fixação da barra durante o corte.

Na extremidade dos atuadores calcadores existe uma ponteira, em material polimérico com a devida forma, para um melhor aperto do perfil e para que a haste do atuador consiga "entrar" no espaço entre as cantoneiras de 6 *mm*.

O suporte dos calcadores foi desenvolvido de modo a ser colocado e retirado com facilidade das rampas, sendo apenas fixo por 4 parafusos. No suporte, existe ainda um casquilho onde o atuador é roscado, conferindo assim, mais rigidez a esta solução.

Os atuadores previstos para cada calcador têm as características expressas na Tabela 4.4.

Os atuadores dos calcadores apresentam movimentos independentes, porque no final do corte o 2º calcador tem que libertar o perfil, acabado de cortar, antes do 1º calcador poder permitir o próximo avanço da barra para a estação de corte até ao batente que define o comprimento do perfil.

Tabela 4.4 - Características do atuador responsável por fixar a barra a cortar.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	16 *mm*
Curso	10 *mm*
Força de avanço	121 *N*
Força de recuo	104 *N*
Velocidade de referência	20 mm/s
Tempo de mov.	0,5 *s*

Junto ao 1º calcador existe ainda um sensor indutivo ($S2$), representado na Figura 4.15, que permite detetar quando a barra encosta ao calcador, para que este último seja elevado e a barra continue a descer.

A máquina de corte consiste numa máquina comum de corte de metal, com um disco de 180 *mm* e uma potência de cerca de 2000 W, visto que esta é a potência menor para a gama de diâmetro requerido.

A esta máquina de corte é necessário associar um movimento basculante através de um suporte articulado desenvolvido em função das necessidades da aplicação.

A escolha de uma máquina comum deve-se ao facto do processo em causa não apresentar grandes exigências, pois apenas é necessário cortar um perfil com uma altura de 10 *mm* e 2 *mm* de largura de alma. Além disso este tipo de equipamento apresenta uma manutenção com baixos custos e que não é executada com frequência. A principal operação de manutenção é sobretudo a substituição do disco, que é uma operação trivial.

Para execução do movimento basculante é utilizado um atuador pneumático que empurra o suporte da máquina de corte, de modo, a realizar o movimento de descida para o corte. Como o atuador não se encontra fixo ao suporte da máquina, não consegue inverter o sentido do movimento realizado para o corte, sendo aplicada uma mola que executa esse movimento de recuo. Esta mola tem ainda a função de manter a máquina de corte numa posição mais elevada, no caso de falha de ar comprimido.

O atuador utilizado deve ser do tipo compacto, pois como este tipo de atuador apresenta um comprimento do corpo mais pequeno, é ideal para o espaço que esta aplicação lhe confina. Assim sendo, este atuador deve obedecer aos requisitos da Tabela 4.5.

Para fixar a máquina de corte ao respetivo suporte, existe ainda uma abraçadeira apropriada que permite apertar a máquina de corte ao suporte, de um modo simples e eficaz. Entre o suporte onde aperta o parafuso da abraçadeira e a parte superior da abraçadeira, existe um espaço livre que permite ajustar este aperto ao longo do tempo, pois com a vibração este tipo de solução tem possibilidade de desapertar.

Tabela 4.5 - Características do atuador que executa o movimento de corte.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	25 mm
Curso	50 mm
Força de avanço	295 N
Força de recuo	247 N
Velocidade de referência	25 mm/s
Tempo de ciclo	4 s

O suporte e a abraçadeira têm entre si umas borrachas, para que aquando da fixação a máquina de corte não seja danificada.

Todo o sistema de corte pode ser observado na Figura 4.16.

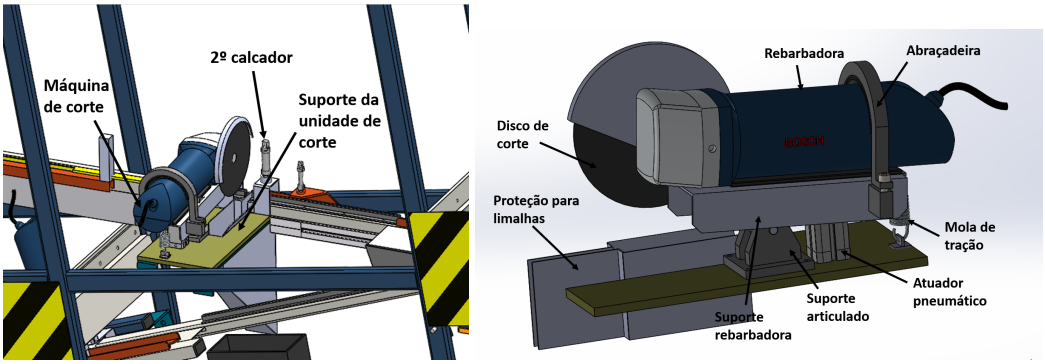


Figura 4.16 - Desenho de especificação da máquina de corte.

Estes elementos são interligados pelo suporte do dispositivo de corte, que tem ainda a função estrutural de unir as rampas que existem antes e depois da estação do corte (rampa 1 e 2), pois para ser executado o corte e para que as limalhas geradas sejam encaminhadas para os devidos depósitos, estas têm de estar separadas e não ser um único corpo.

Uma vez que esta é uma unidade que apresenta algum perigo deve conter as devidas proteções de segurança, com cores indicativas de perigo. Deste modo, foram previstas umas chapas quinadas, com uma configuração específica, que protegem completamente a máquina de corte, como é possível observar na Figura 4.17.

As proteções que envolvem a máquina são aparafusadas ao suporte do dispositivo de corte e só podem ser removidas para efeitos de manutenção.

Para efetuar a manutenção da máquina de corte, nomeadamente a substituição do disco de corte, as proteções têm que ser removidas e o veio do suporte da articulação retirado, ficando assim o conjunto superior da máquina de corte livre para ser removido daquela zona.

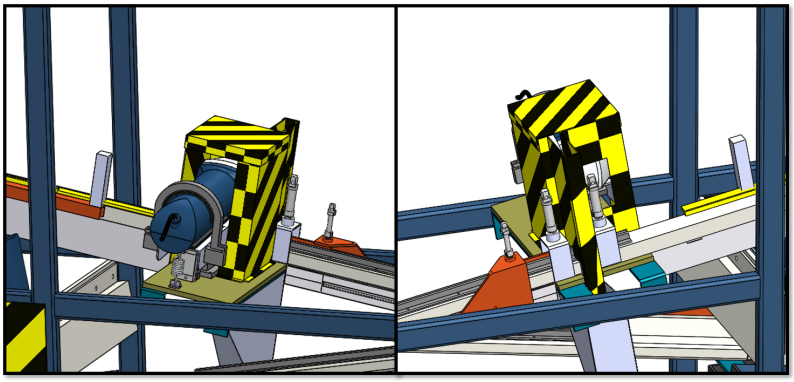


Figura 4.17 - Proteções da unidade de corte.

Por fim, junto ao dispositivo de corte existem uns bicos pneumáticos, que permitem criar um sopro de ar durante o corte, para eliminar as limalhas criadas.

4.1.5 Solução de rebarbagem

Este subconjunto funcional é muito importante, pois é nele que as superfícies extremas do perfil são rebarbadas para remover irregularidades superficiais e eliminar as rebarbas provenientes do corte.

Para ser possível rebarbar as duas extremidades do perfil foram criados dois dispositivos sucessivos de rebarbagem, um para a rebarbagem de cada superfície extrema.

A Figura 4.18 mostra como estão dispostos os dois dispositivos de rebarbagem na unidade de corte.

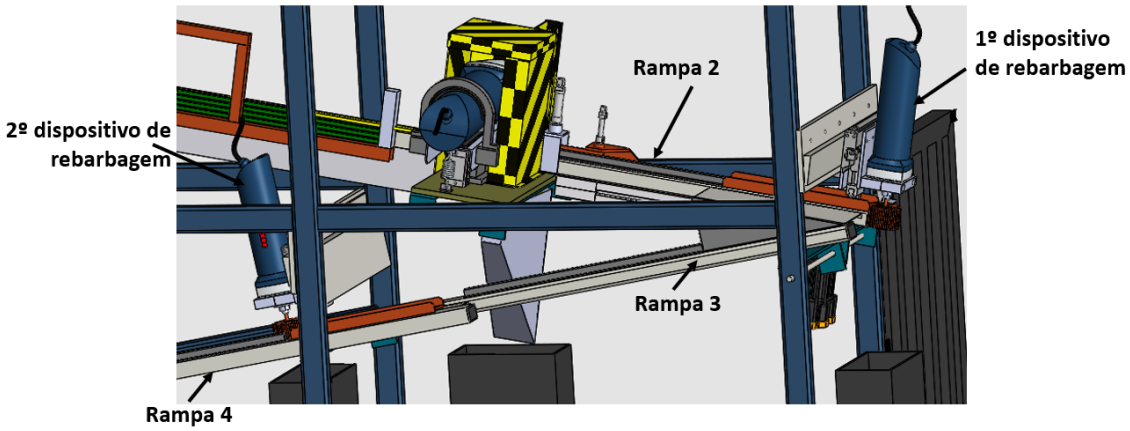


Figura 4.18 - Solução de rebarbagem.

Cada dispositivo de rebarbagem apresenta as seguintes operações:

- **a)** descida do perfil por gravidade até um batente angular móvel;
- **b)** fixação do perfil pela garra pneumática;
- **c)** remoção do batente, para permitir acesso à superfície a rebarbar;
- **d)** atuação da ferramenta de rebarbagem;
- **e)** avanço e recuo da ferramenta de rebarbagem;
- **f)** limpeza por sopro pneumático;
- **g)** transporte do perfil para próxima estação e sua libertação.

A Figura 4.19 representa os vários elementos do 1º dispositivo de rebarbagem e que permitem realizar as funções referidas.

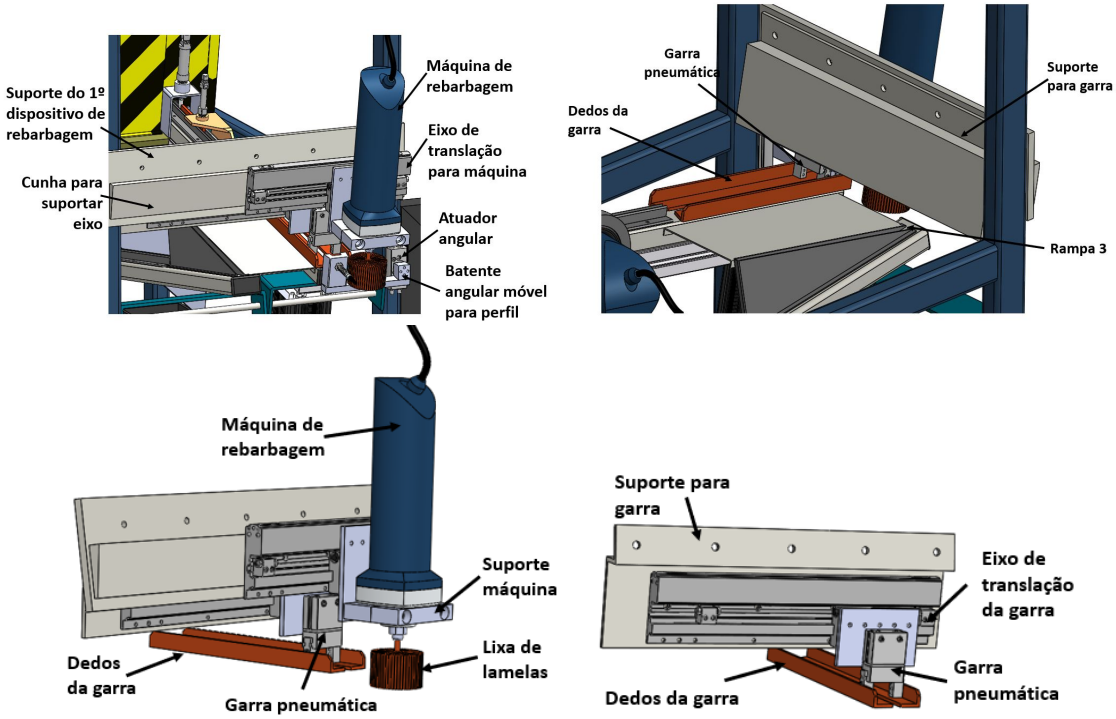


Figura 4.19 - Detalhe do 1º dispositivo de rebarbagem.

O batente, em alumínio, colocado no final da rampa serve para travar o movimento de descida do perfil que provém da estação de corte. O batente tem a forma adequada para que o perfil fique encaixado no seu interior e, desta forma, garantir que os últimos 10 *mm* do perfil ficam fora da rampa de descida, para que depois de retirado o batente a face do perfil fique livre para posteriormente ser rebarbada.

O movimento de rotação do batente (para que o perfil fique livre) é executado por um atuador angular como se pode verificar na Figura 4.20, e cujas características são apresentadas na Tabela 4.6.

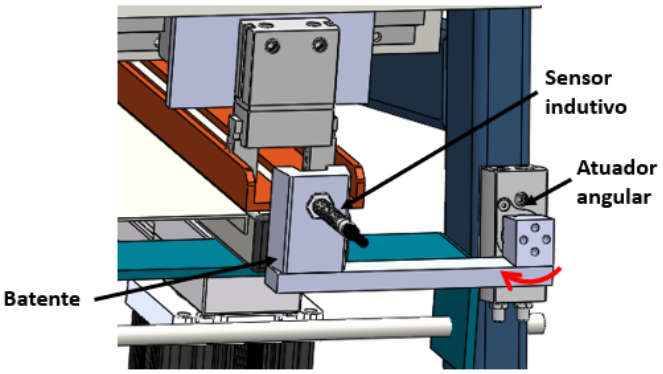


Figura 4.20 - Batente angular móvel do 1º dispositivo de rebarbagem.

Tabela 4.6 - Características do atuador angular para batente.

Características	
Solução construtiva	cremalheira/pinhão
Energia	pneumática
Tamanho	8 *mm*
Rotação	90 º
Binário	0,02 *Nm*
Velocidade de referência	3 rad/s
Tempo de mov.	1 *s*

Neste batente é ainda incorporado um sensor indutivo ($S3$), que permite detetar se o perfil encosta realmente ao batente.

Para dar seguimento à rebarbagem do perfil é necessário previamente fixá-lo, utilizando para esse fim uma garra pneumática constituída por uns dedos auxiliares, com cerca de 290 *mm*, que abrangem os perfis de maior comprimento. Para a garra pneumática são propostas as propriedades apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características da garra de fixação do perfil na rebarbagem.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Tamanho	16 *mm*
Curso	10 *mm*
Força de aperto	96 *N*
Força de abertura	105 *N*
Velocidade de referência	20 mm/s
Tempo de aperto	0,5 *s*

Para realizar a rebarbagem da face do perfil selecionou-se uma máquina retificadora direita

profissional com uma potência de cerca de 600 W. Possui como ferramenta uma lixa de lamelas, que ao possuir várias lamelas permite flexibilidade para se ajustar à face do perfil.

O motivo da escolha deste equipamento é igual ao motivo da escolha da máquina de corte. É um equipamento comum e, por isso, apresenta um preço acessível e uma manutenção reduzida e fácil.

O equipamento para rebarbar está fixo por uma abraçadeira própria a um eixo linear pneumático guiado, que executa um movimento de vaivém permitindo pelo menos 4 passagens da lixa pela face do perfil até que fique sem rebarbas.

O atuador utilizado deve ser suficientemente robusto para suportar a vibração e o esforço que advém do processo de rebarbagem. Deste modo, foi selecionado um modelo de eixo pneumático que dispõe de um guiamento mecânico compacto, o que é muito vantajoso dadas as limitações de espaço que têm de ser cumpridas entre a garra e a lixa de rebarbagem. Para este atuador são propostas as características da Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Características do eixo linear usado no movimento de rebarbagem.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	18 mm
Curso	100 mm
Força de avanço/recuo	153 N
Velocidade de referência	50 mm/s
Tempo de ciclo	8 s

Em cada dispositivo de rebarbagem existem também uns bicos pneumáticos que permitem remover as limalhas provenientes da operação de rebarbagem.

Após a operação de rebarbagem, o perfil (que ainda se encontra apertado pelos dedos da garra) é transportado para a próxima rampa de descida (rampa 3) para executar a rebarbagem da outra extremidade do perfil. Para que este movimento seja realizado, é utilizado um outro eixo linear pneumático (com o mesmo modelo do que o eixo que executa a translação da máquina de rebarbagem) que transporta a garra e, portanto, o perfil, para a próxima posição. Sendo que aí a garra é desatuada e o perfil largado e forçado a cair para a rampa de descida.

Apesar de o eixo que transporta a garra possuir o mesmo modelo do eixo linear pneumático que transporta a retificadora existem algumas diferenças, como se pode verificar na Tabela 4.9.

A ligação entre os dispositivos de rebarbagem e a estrutura base é feita por um suporte aparafusado. Além deste suporte, existem ainda mais dois suportes, o suporte da garra e a cunha da máquina de rebarbar. Estes permitem orientar a máquina de rebarbar e a garra em função da inclinação das rampas de descida, pois o suporte do dispositivo de rebarbagem é colocado na vertical e só com estes suportes especiais a máquina de rebarbar e a garra ficam paralelas às rampas.

Tabela 4.9 - Características do eixo linear usado no movimento de transporte do perfil.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	18 mm
Curso	200 mm
Força de avanço/recuo	153 N
Velocidade de referência	80 mm/s
Tempo de ciclo	5 s

O 2º dispositivo de rebarbagem é conceptualmente igual ao primeiro, e encontra-se representado na Figura 4.21.

Neste 2º dispositivo de rebarbagem, a garra larga o perfil na rampa de descida que dá origem à zona de inserção dos perfis nas cassetes, rampa 4.

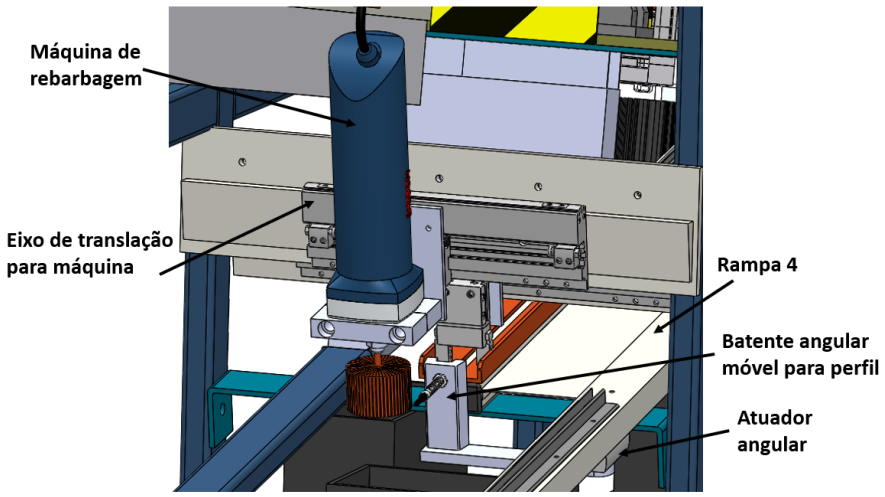


Figura 4.21 - Detalhe de instalação do 2º dispositivo de rebarbagem.

Neste dispositivo de rebarbagem, é utilizado também um atuador angular para movimentar o batente, como no 1º dispositivo. Contudo, o batente do 2º dispositivo apresenta uma configuração diferente.

O transporte do perfil entre as duas estações de rebarbagem é assegurado pela rampa 3. No entanto, em cada dispositivo de rebarbagem existem sempre duas rampas de descida, uma que traz o perfil ao dispositivo de rebarbagem e outro que leva o perfil à próxima estação de trabalho.

Com esta solução de 2 dispositivos de rebarbagem deixa de ser necessária a conceção de um mecanismo extra para rodar o perfil, permitindo assim diminuir significativamente o tempo associado a esta estação de trabalho, já que as duas operações se podem desenrolar em simultâneo.

À semelhança da máquina de corte, é necessário considerar a colocação de proteções, com as devidas cores, nos dispositivos de rebarbagem devido à elevada velocidade de rotação destas máquinas. Deste modo, são aparafusadas umas chapas quinadas em torno dos equipamentos que apresentam maior perigo, como é possível visualizar na Figura 4.22.

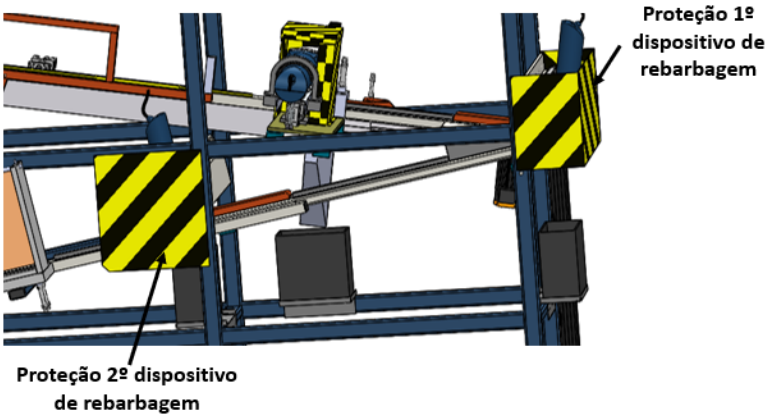


Figura 4.22 - Proteções dos dispositivos de rebarbagem.

Como a proteção implementada no 2º dispositivo de rebarbagem não é suficiente foi introduzida uma proteção auxiliar representada na Figura 4.23.

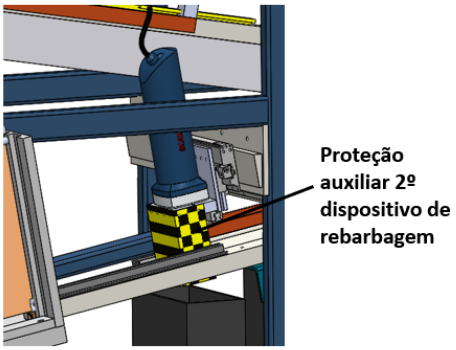


Figura 4.23 - Proteção auxiliar do 2º dispositivo de rebarbagem.

4.1.6 Armazenagem de perfis

Após a preparação dos perfis é necessário organizá-los para serem empilhados e transportados para a unidade de soldadura, sendo para isso inseridos na vertical em cassetes.

O conjunto de armazenamento de perfis é constituído por: atuador pneumático, que empurra os perfis; mesa de suporte para cassetes (até duas); cassetes e mecanismo de inserção de perfis, para cada cassete. Estes elementos encontram-se representados na Figura 4.24.

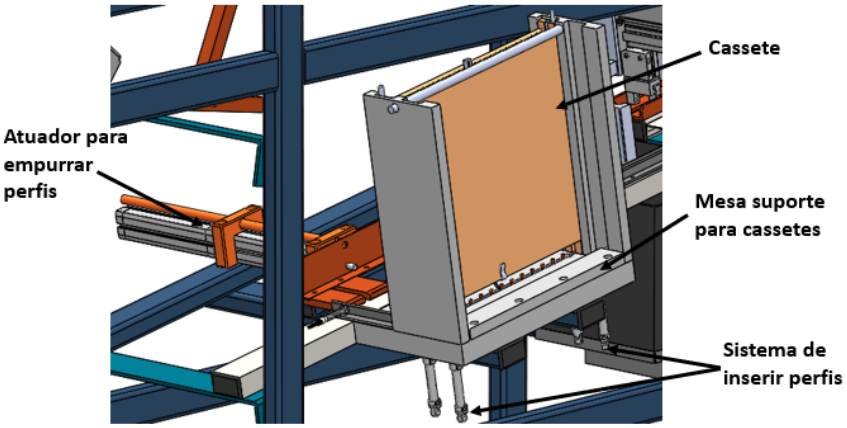


Figura 4.24 - Sistema de armazenamento de cassetes.

O atuador que retira o perfil desde a rampa 3 é um atuador pneumático de 3 posições que empurra cada perfil desde a sua posição retida no fim da rampa 3 até à zona de inserção dos perfis numa das duas cassetes.

Este atuador não apresenta grandes esforços, pois apenas necessita de empurrar o perfil sobre uma superfície. Deste modo, este atuador deve possuir as características expostas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Características do atuador que empurra os perfis até à zona de inserção dos perfis nas cassetes.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito de 3 posições
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	25 mm
Curso 1	130 mm
Curso 2	170 mm
Força de avanço	295 N
Força de recuo	245 N
Velocidade de referência	30 mm/s
Tempo de ciclo	12 s

Na haste do atuador é colocada uma ferramenta apropriada para que o perfil seja empurrado devidamente, como explicado na solução de princípio. Para possibilitar que a ferramenta seja guiada, foi incluído um varão guiado em dois casquilhos. Estes suportes têm ainda a função de fixar o atuador à estrutura base da unidade de corte, como se ilustra na Figura 4.25.

Para travar o movimento de descida do perfil na rampa 4, existe um batente fixo que permite parar o perfil.

Também neste batente fixo está inserido um sensor indutivo ($S5$) que deteta a chegada do perfil para de seguida ser empurrado.

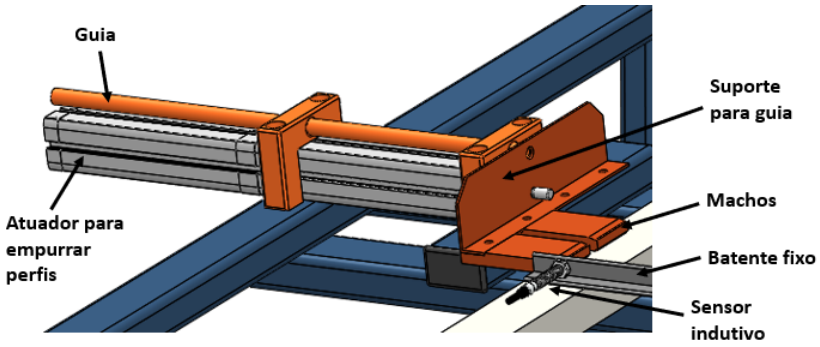


Figura 4.25 - Atuador que empurra perfil para a zona de inserção dos perfis nas cassetes.

A mesa do suporte onde são inseridas as cassetes é constituída por duas faces laterais e uma base. A base resulta de uma chapa de material na qual são maquinados uns rasgos para encaixar os mecanismos de inserção de perfis. As faces laterais possuem também uns rasgos maquinados com a largura das cassetes, para estas serem devidamente colocadas.

A base do suporte conta ainda com dois pinos que encaixam em furos nas cassetes e, deste modo, é garantido o posicionamento das mesmas. Estes dois pinos têm tamanhos diferentes para que seja impossível que o operador as posicione indevidamente.

Na Figura 4.26 está ilustrada a mesa de suporte das cassetes.

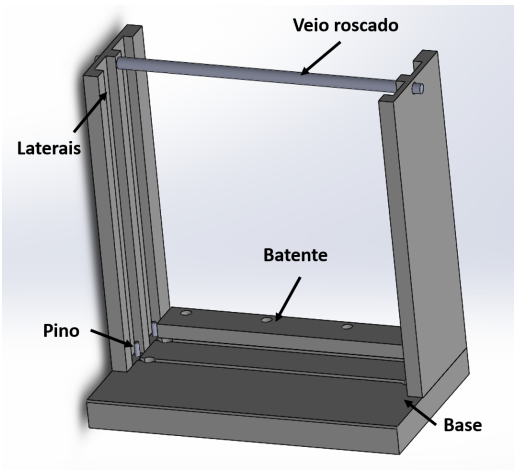


Figura 4.26 - Representação da mesa de suporte das cassetes.

As cassetes concebidas têm um comprimento de 320 *mm*, uma largura de 30 *mm* e uma altura de 300 *mm*.

Este comprimento foi escolhido para ser possível alojar perfis até 300 *mm* e, ainda, restar algum comprimento para ser criada uma estrutura rígida. A largura da cassete divide-se em duas laterais de 12 *mm* de espessura e um espaço entre elas de 6 *mm*, para que o perfil com uma aba de 5 *mm* possua folga. Por fim, a altura foi definida de modo a permitir alojar até 30 perfis.

As duas laterais apresentam uns rasgos maquinados que permitem colocar uma peça divisora que define o comprimento dos perfis alojar na cassete. Para evitar a maquinagem de demasiados rasgos ao longo das cassetes, pelo facto de o comprimento do perfil variar potencialmente de 5 em 5 *mm*, a peça divisora apresenta uma configuração que permite definir dois comprimentos quando posicionada no mesmo rasgo, tendo apenas de ser rodada 180º.

Foram desenvolvidas umas chapas elásticas retentoras, cujo o objetivo é impedir que os perfis não caiam das cassetes após serem inseridos. Deste modo, ao inserir cada perfil estas chapas deformam-se deixando-o passar, mas ao retirar o mecanismo voltam à sua posição normal segurando o perfil dentro da cassete. Estas molas são colocadas nas duas extremidades e, ainda, na peça divisora para aquando da inserção dos perfis.

Deve ainda ser salientado que as cassetes possuem um rasgo junto à superfície inferior para que os perfis possam entrar por baixo das cassetes e ficarem posicionados corretamente na abertura que existe entre as laterais das cassetes para depois serem inseridos ou, caso se verifique, para serem empurrados para a segunda cassete.

A Figura 4.27 ilustra a constituição detalhada da cassete.

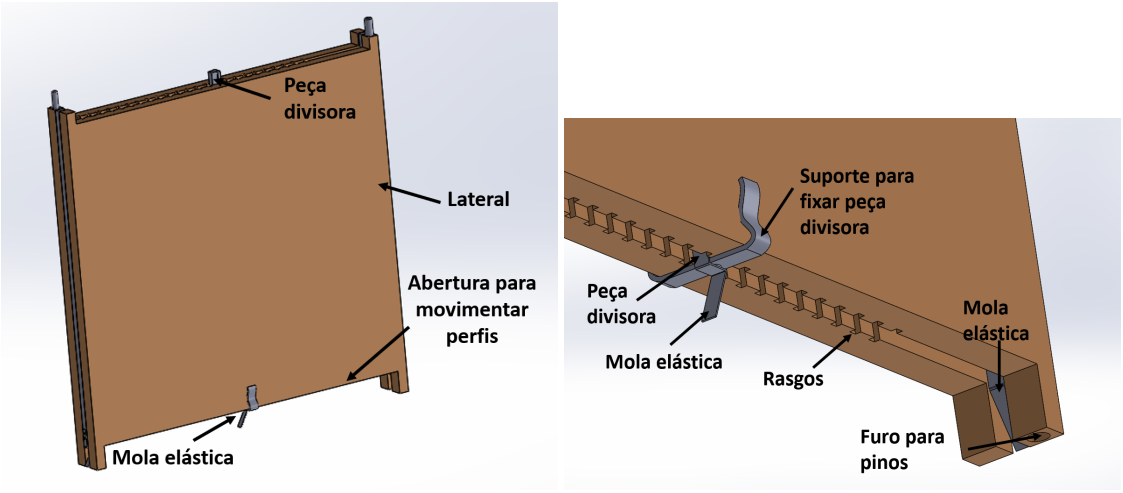


Figura 4.27 - Desenho de detalhe construtivo de uma cassete.

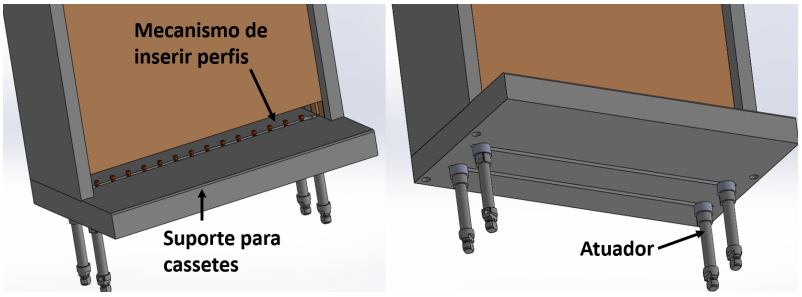
O mecanismo de inserção de perfis utilizado para colocar os perfis dentro das cassetes é constituído por dois atuadores pneumáticos que garantem o movimento vertical de uma "mini" barra de suporte que pressiona o perfil durante o movimento de subida. Deste modo, como existem duas cassetes, existem, respetivamente, dois mecanismos de inserção de perfis.

Na barra de suporte são dispostas pequenas peças circulares com um pequeno pino e cujo o diâmetro não ultrapassa 5 *mm*, de modo a permitir que estas peças entrem no interior das cassetes, garantindo que o perfil fica realmente dentro da cassete.

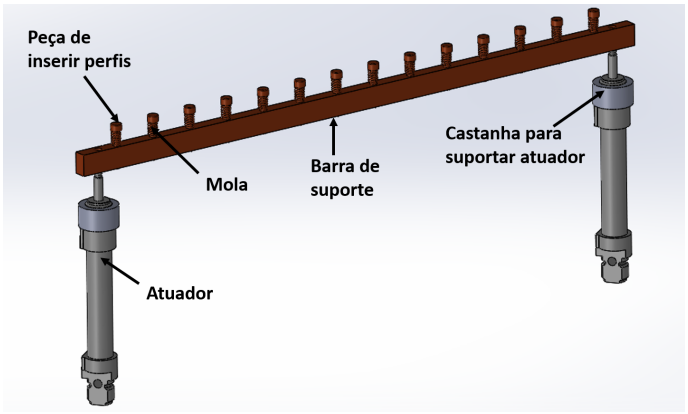
Além das peças circulares de inserir perfis, são colocadas em simultâneo umas pequenas molas que tornam esta aplicação flexível o suficiente para ser possível inserir perfis desde 50 a 300

mm dentro das cassetes, pois no caso de algum perfil ficar preso por algum motivo durante o movimento de subida, a compressão das molas permite compensar o movimento, auxiliando o movimento de inserção. Além disso, mesmo que o perfil não ocupe o comprimento total desta peça, as peças circulares, em conjunto com as molas, que não possuem perfil podem entrar dentro das cassetes sem nenhum problema.

A Figura 4.28 representa o mecanismo utilizado e a forma como este é fixo à mesa de suporte das cassetes, em que são utilizadas umas castanhas onde roscam os atuadores.



(a) Vita global.



(b) Detalhe do mecanismo de inserção de perfis.

Figura 4.28 - Mecanismo de inserção de perfis nas cassetes.

Os quatro atuadores que realizam o movimento de inserção são iguais e apresentam as propriedades apresentadas na Tabela 4.11.

4.1.7 Conjuntos auxiliares

Nesta secção são apresentados alguns elementos complementares que foram incluídos na conceção da unidade de corte, mas dos quais esta unidade não necessita obrigatoriamente para funcionar.

Tendo a conceção global sido assente na utilização de rampas para a movimentação dos perfis entre estações de trabalho, a sua inclinação pode não estar suficientemente ajustada para que os

Tabela 4.11 - Características dos atuadores para inserção de perfis nas cassetes.

Características	
Solução construtiva	simples efeito normalmente recuado
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	10 *mm*
Curso	25 *mm*
Força de avanço	41 *N*
Velocidade de referência	10 mm/s
Tempo de ciclo	5 *s*

perfis de menor comprimento deslizem sozinhos. Deste modo, foram previstos uns bicos pneumáticos nas secções das rampas onde possa existir maior probabilidade de um perfil ficar imóvel. Através destes bicos são criados uns sopros no banzo inferior de um perfil, para evitar que o perfil fique preso. Estes elementos estão representados na Figura 4.29.

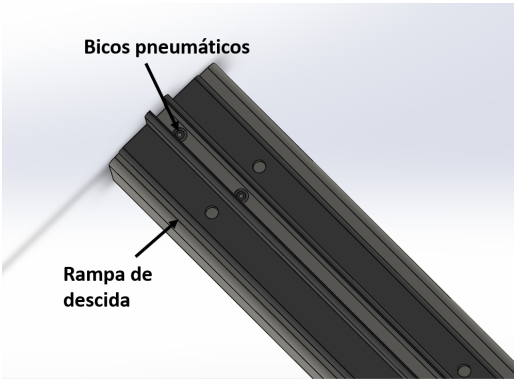


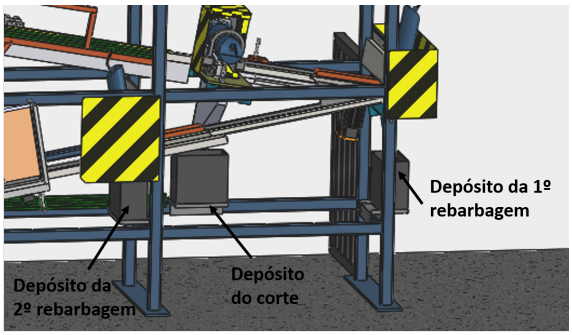
Figura 4.29 - Rampa de descida com bicos pneumáticos representados.

Os bicos pneumáticos estão inseridos antes e depois de cada estação, isto é, antes e depois do corte, da 1ª rebarbagem e da 2ª rebarbagem.

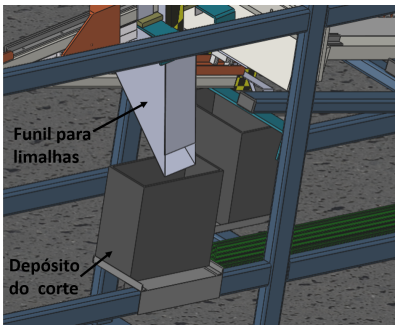
Para cumprir os requisitos ambientais, foram colocados depósitos para recolha de limalhas geradas durante o corte e a rebarbagem, como se pode observar na Figura 4.30. Esta figura representa ainda um funil que é colocado para encaminhar as aparas para o depósito. O exemplo ilustrado corresponde ao depósito da estação do corte, mas todas as outras estações de trabalho têm solução semelhante.

Foram colocadas umas chapas entre as rampas 2 e 3 e as rampas 3 e 4 para que o perfil seja devidamente encaminhado durante o transporte pela garra. Estas chapas são quinadas e aparafusadas às rampas, como se pode verificar na Figura 4.31

Para evitar que entre pó ou outras sujidades para o interior dos tubos foram colocadas tampas plásticas em todos os topos dos perfis tubulares da estrutura base.



(a) Ilustração dos depósitos para limalhas da unidade de corte.



(b) Exemplificação do funil para direcionar as limalhas para o depósito.

Figura 4.30 - Depósitos para as limalhas da unidade de corte.

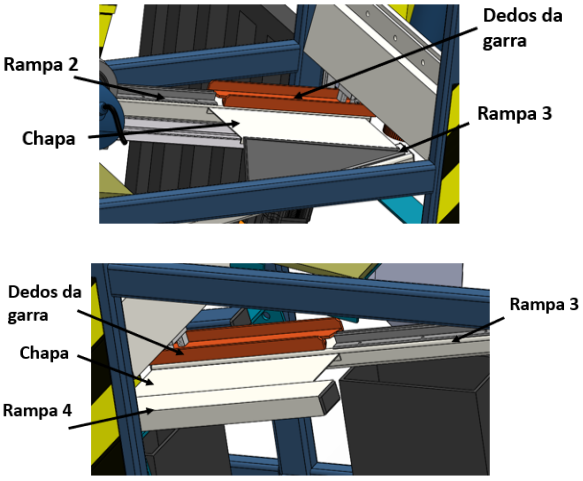


Figura 4.31 - Ilustração das chapas colocadas entre as rampas de descida.

Por fim, foi dado um cuidado acrescido em relação às sobras, de modo, a que estas não sejam totalmente desaproveitadas. Para isso, quando as barras são detetadas como sobras, são encaminhadas para um depósito colocado no final da rampa 3.

Posteriormente, estas sobras poderão ser alvo de avaliação para averiguar se podem ser cortadas, ou não, em perfis mais pequenos. No caso, de poderem ser reaproveitadas estas poderão ser colocadas, manualmente, na zona de alimentação da unidade de corte.

4.2 Unidade de soldadura

É nesta unidade de produção que são executadas as "chapas de reforço equipadas" para o rotor e para o estator de um motor elétrico, ou seja, onde são soldados os perfis previamente preparados na unidade de corte, em chapas laminadas de reforço do rotor e do estator. Assim sendo, esta unidade deve manipular os perfis que se encontram nas cassetes (carregadas na unidade de corte) até as chapas, onde irão ser soldados por uma máquina de soldadura por pontos que se move radialmente de modo a realizar os diferentes pontos sobre o perfil.

Para aumentar a produtividade da nova máquina foram previstas duas máquinas de soldadura por pontos, cada uma com o respetivo sistema de manipulação de perfis e que, deste modo, permite a soldadura simultânea de 2 perfis.

A cada máquina está associado um manipulador de perfis, encarregue de transportar os perfis, e uma unidade de alimentação, constituída por duas cassetes com perfis.

Deste modo, deve ser evidenciado que existem na totalidade 4 cassetes de perfis nesta unidade, o que corresponde a $30 \times 4 = 120$ perfis, o que satisfaz as necessidades totais de uma chapa.

Dada a disposição das duas máquinas de soldadura e dos respetivos sistemas de manipulação de perfis, foram previstos dois locais de armazenamento de chapas: um para as chapas sem perfis, que serão colocadas sobre a mesa manualmente, e outro para as chapas com perfis que serão retiradas da mesa, também manualmente.

A Figura 4.32 apresenta os fluxos existentes entre as diferentes partes constituintes. As setas a verde representam o movimento de chapas, as setas amarelas representam o movimento de cassetes desde o seu local de armazenamento e as setas a vermelho dizem respeito ao movimento de perfis desde as cassetes para o centro da mesa. Estão ainda representadas, a azul, as portas destinadas à passagem do operador e umas pequenas aberturas, a verde, para a entrada/saída de paletes com chapas.

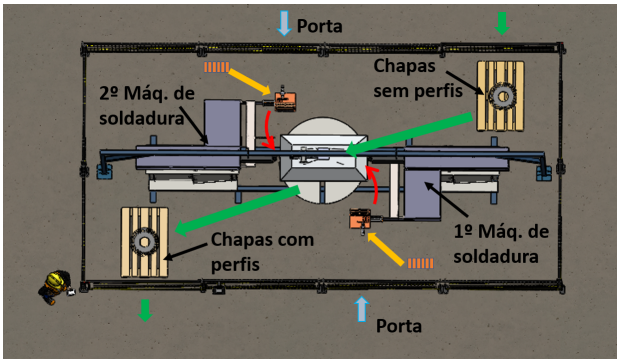


Figura 4.32 - Representação dos fluxos de trabalho.

Esta unidade compreende vários elementos que executam diferentes funções, e que são apresentados na Figura 4.33:

- **a)** estrutura central:
  - **a1)** estrutura base;
  - **a2)** mesa central de soldadura;
- **b)** dois mecanismos de soldadura:
  - **b1)** máquina de soldadura por pontos;
  - **b2)** unidade de alimentação de perfis;
  - **b3)** manipulador de perfis;
- **c)** mecanismo de posicionamento das chapas;
- **d)** sistema de exaustão de fumos;
- **e)** proteções;
- **f)** armazenamento de chapas:
  - **f1)** pilhas de chapas de entrada;
  - **f2)** pilhas de chapas de saída.

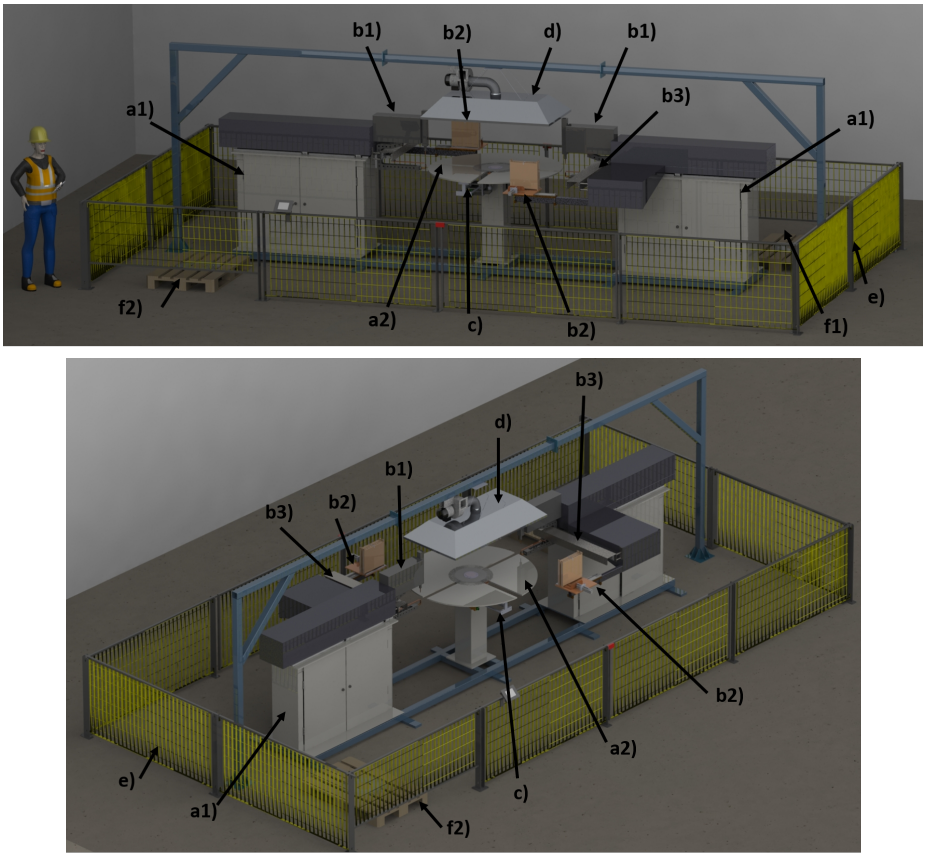
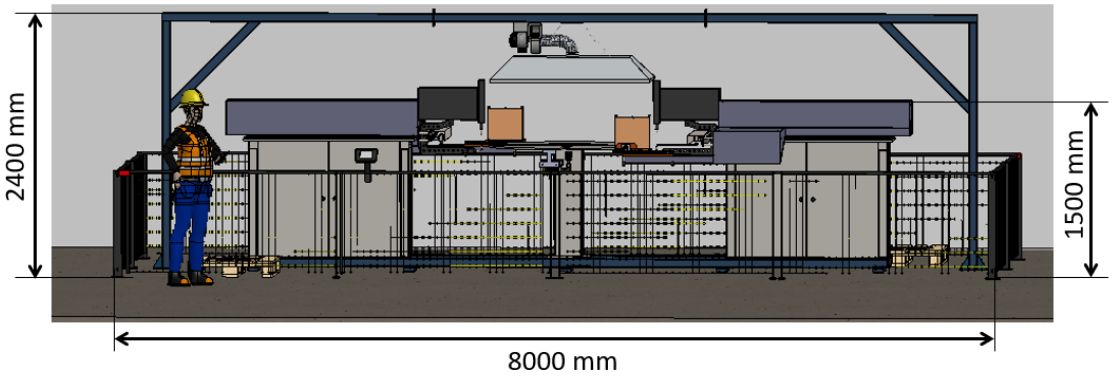


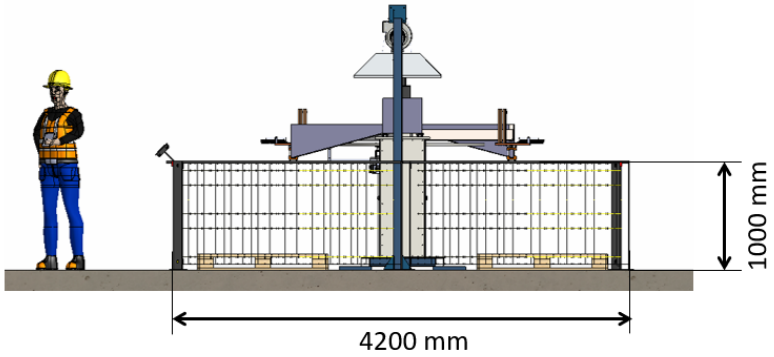
Figura 4.33 - Desenho global da constituição da unidade de soldadura.

À semelhança do que acontece na unidade de corte, os conjuntos funcionais são expostos de seguida com uma descrição em mais detalhe.

A Figura 4.34 representa as dimensões mais importantes da unidade de soldadura.



(a) Vista central.



(b) Vista lateral.

Figura 4.34 - Dimensões gerais da unidade de soldadura.

4.2.1 Estrutura global

A estrutura global da unidade de soldadura é um subconjunto rígido e sobre a qual estão associados todos os outros elementos.

Esta estrutura divide-se em duas partes, que estão apresentadas na Figura 4.35 :

- **estrutura base de soldadura** - compreende a base de soldadura e o suporte de soldadura, sobre o qual está colocado o mecanismo de soldadura;
- **mesa central de soldadura** - sobre a qual são postas as chapas para soldar os perfis;

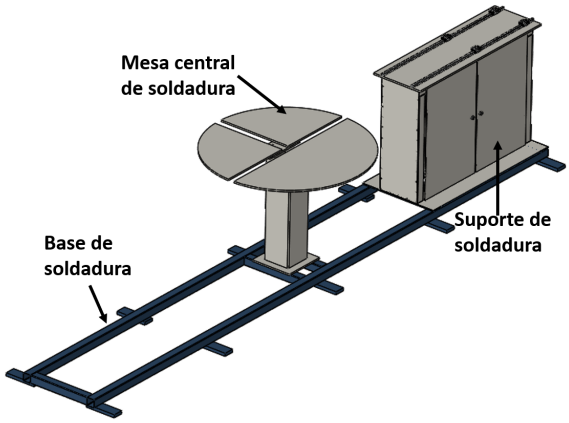


Figura 4.35 - Representação dos elementos da estrutura global.

4.2.1.1 Estrutura base de soldadura

Esta secção descreve a estrutura base de soldadura desta unidade que sustenta a maior parte dos conjuntos funcionais.

A base de soldadura é constituída por perfis tubulares de secção quadrada, de aço com costura, de dimensão 80×80 *mm*, aos quais são soldados uns pés que elevam ligeiramente a estrutura do chão, como é possível confirmar na Figura 4.36.

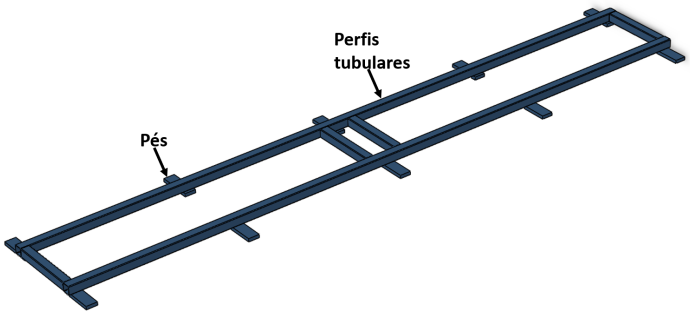
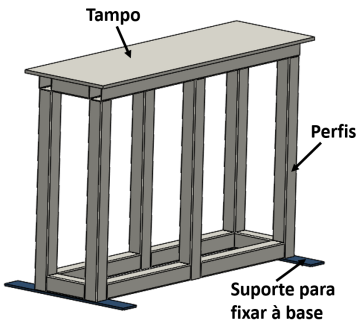


Figura 4.36 - Desenho de detalhe da base de soldadura.

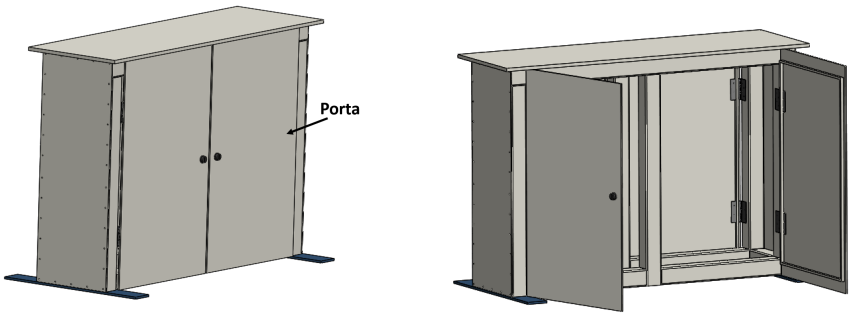
O suporte de soldadura é semelhante a uma mesa, ou seja, é constituída por uns perfis iguais aos da base que formam umas "pernas" e por uma base de metal a fazer de tampo, como se pode ver na Figura 4.37.

Este suporte é resguardado por umas chapas aparafusadas e são colocadas umas portas que possibilitam a criação de um armário para armazenar os componentes elétricos e componentes de comando para os elementos pneumáticos, por exemplo.

Sobre o tampo desta estrutura são colocadas umas guias lineares, sobre as quais deslizam umas carruagens que suportam o conjunto de soldadura que irá executar os vários pontos de soldadura



(a) Representação do suporte de soldadura sem chapas para resguardar.



(b) Representação do suporte de soldadura com chapas para resguardar.

Figura 4.37 - Representação do suporte de soldadura.

ao longo do comprimento do perfil.

4.2.1.2 Mesa de soldadura

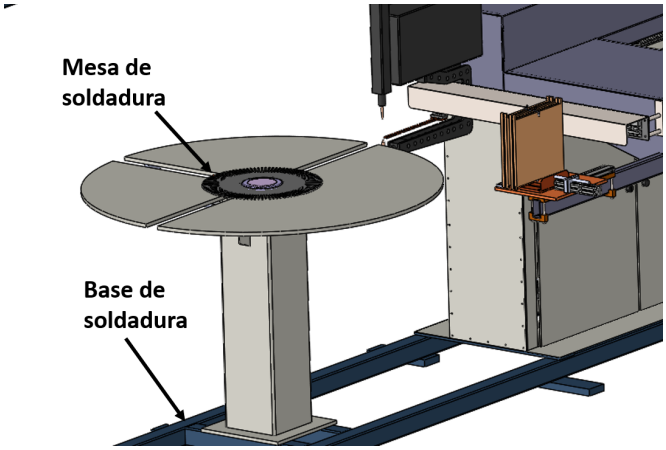
A mesa de soldadura encontra-se fixa e numa posição central em relação a toda a unidade de soldadura. Esta deve receber as chapas de reforço de rotores e de estator, que aí são colocadas manualmente.

Esta mesa tem uma coluna central, em perfil tubular de secção quadrada, de aço com costura, de 260×260 *mm*, sendo nas suas extremidades soldadas duas flanges, uma que assegura a ligação da mesa à base de soldadura e a outra que suporta o tampo da mesa.

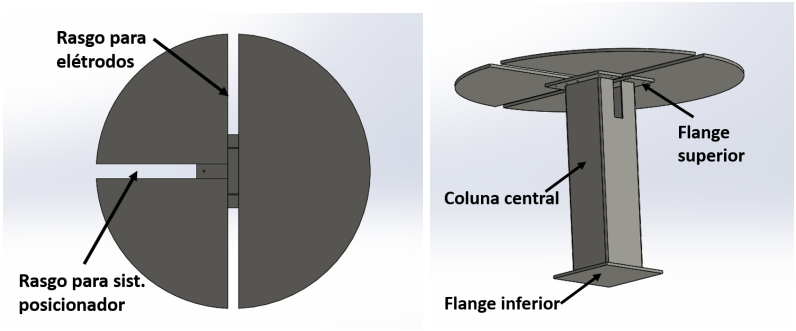
O tampo da mesa apresenta dois rasgos: um rasgo permite o movimento radial dos elétrodos e outro dá acesso a que um posicionador rode a chapa para a nova posição incremental angular de soldadura, como será explicado de seguida. Além da mesa, também a coluna central possui um rasgo por onde passam os elétrodos.

Dada a implementação da solução da carruagem de soldadura e da pistola de soldadura, é possível atingir diâmetros menores sem a necessidade de utilizar dois tampos para a mesa, como tinha sido mencionado na solução de princípio. Sendo assim, o tampo da mesa tem um diâmetro de 1500 *mm*.

A Figura 4.38 apresenta a mesa de soldadura concebida para a solução de soldadura.



(a) Apresentação da mesa de soldadura.



(b) Detalhes da mesa de soldadura.

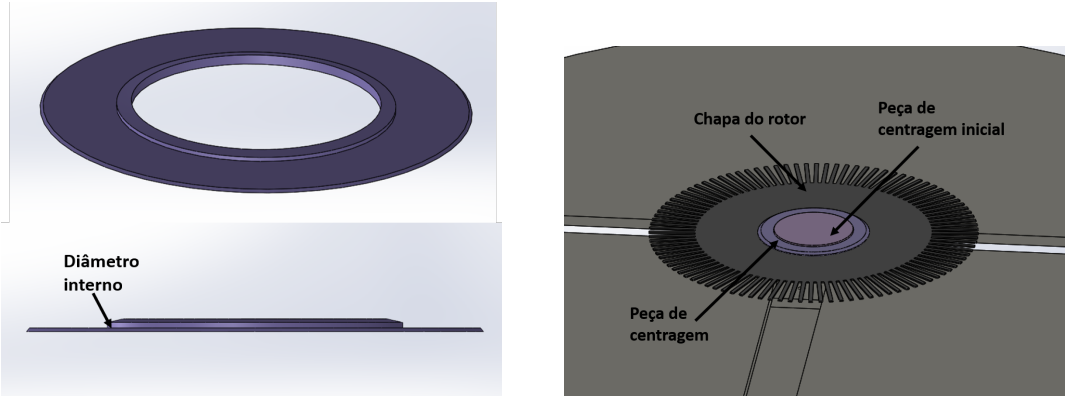
Figura 4.38 - Mesa de soldadura.

Apesar do posicionador, que será abordado de seguida, garantir o correto posicionamento das chapas, é necessário garantir que estas se mantenham centradas na mesa durante o movimento de rotação. Sendo assim, foram desenvolvidas peças de centragem à semelhança das que foram propostas no estudo prévio.

A centragem das chapas é realizada pelo seu diâmetro interno. Como existe alguma variedade de diâmetros das chapas, e algumas delas com uma dimensão considerável, no caso de as peças de centragem serem uma única peça seriam demasiado pesadas. Assim sendo, foi prevista uma solução na qual estas peças são ocas no seu centro e vão encaixando, umas sobre as outras, até ser atingido o diâmetro interno desejado.

A Figura 4.39 representa três destas peças, sendo que a primeira peça colocada sobre a mesa (a mais pequena) está sempre fixa à mesa e tem a função de ser a peça base de centragem.

Estas peças de centragem apresentam um pequeno degrau que permite elevar ligeiramente a chapa diminuindo, assim, a força de arrasto da chapa durante o movimento de rotação.



(a) Peça de centragem. (b) Peças de centragem com chapas.

Figura 4.39 - Ilustração das peças de centragem.

4.2.2 Mecanismo de soldadura

O mecanismo de soldadura é responsável por executar todas as funções relacionados com a soldadura e com a manipulação de perfis. Deste modo é constituído por:

- máquina de soldadura por pontos;
- unidade de alimentação de perfis;
- manipulador de perfis;

Estes subconjuntos funcionais estão colocados sobre uma carruagem de soldadura, que é suportada por pequenas carruagens que deslizam em guias lineares e permitem realizar os vários pontos de soldadura, movendo simultaneamente os 3 elementos do mecanismo de soldadura.

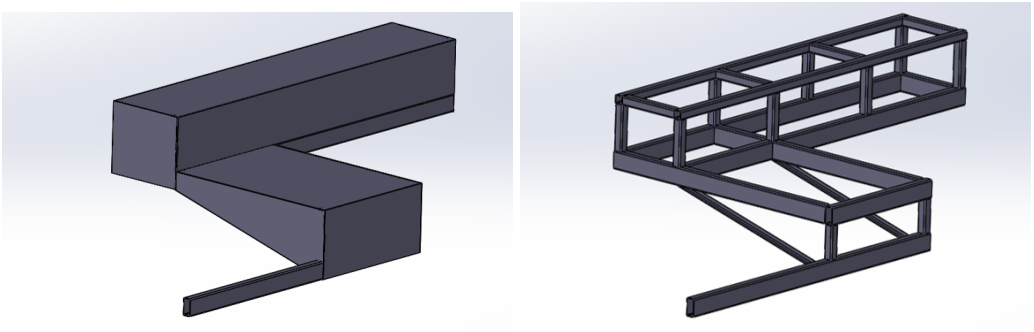
A carruagem de soldadura apresenta uma estrutura rígida feita de perfis tubulares de secção quadrada, de aço com costura, de 40×40 *mm* e nos locais sujeitos a maiores esforços são utilizados perfis com uma dimensão 80×40 *mm*.

Esta estrutura possui um braço sobre a qual vai ser colocada a unidade de alimentação dos perfis. Como este braço está transladado para fora do diâmetro da mesa, impede que a unidade de alimentação choque com a mesa de soldadura, uma vez que a unidade de alimentação de perfis se encontra ao nível da mesa de soldadura para alimentar os perfis ao nível da chapa.

Tendo em conta o momento a que está sujeita a carruagem de soldadura, foram colocados uns perfis "em triângulo" para proporcionar uma maior rigidez.

Como esta zona da carruagem de soldadura apresenta alguma fragilidade, foi executada uma simulação dimensional em *SolidWorks* que permitiu uma otimização desta estrutura. A simulação é apresentada no Anexo A.2.

Em torno da estrutura da carruagem de soldadura são colocadas umas chapas que têm como objetivo revestir os espaços abertos, como é possível observar na Figura 4.40.



(a) Carruagem de soldadura com chapas de resguardo.

(b) Carruagem de soldadura sem chapas de resguardo.

Figura 4.40 - Representação da carruagem de soldadura.

Dada a dimensão da carruagem de soldadura são utilizadas duas guias lineares, contendo duas carruagens de deslizamento cada uma, como representado na Figura 4.41.

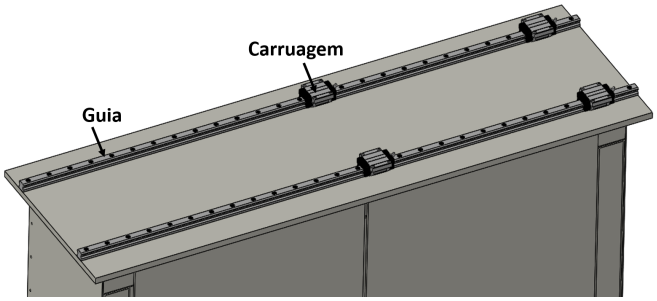


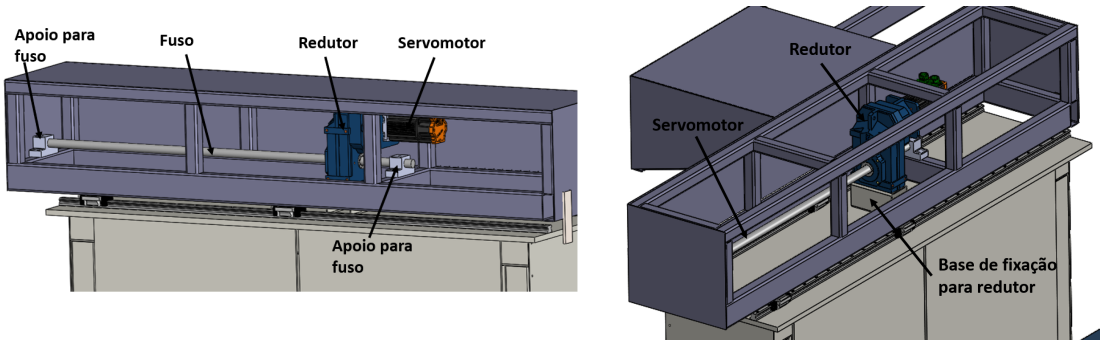
Figura 4.41 - Representação das guias lineares com carruagens de deslizamento.

O dimensionamento das guias e das carruagens de deslizamento é apresentado no Anexo A.3.

O movimento da carruagem de soldadura é executado por um servomotor acoplado a um redutor que contém um fuso. O fuso atravessa o redutor e não é animado de rotação, pois como a fêmea do fuso está inserida no redutor, ao rodar, translada sobre o fuso e obriga a carruagem de soldadura acompanhar o seu movimento.

Esta solução encontra-se no interior da carruagem de soldadura e está representada na Figura 4.42.

O servomotor deve ainda possuir um travão que impeça o movimento deste quando desligado, para que não seja perdida a sua posição.



(a) Vista da frente. (b) Vista lateral.

Figura 4.42 - Solução de acionamento da carruagem de soldadura.

4.2.2.1 Máquina de soldadura por pontos

O tipo de máquina de soldadura utilizada para realizar os pontos de soldadura é uma pistola de soldadura usada normalmente em manipuladores robóticos.

A escolha deste tipo de máquina deve-se a esta apresentar uma massa relativamente pequena e se adequar perfeitamente às exigências desta aplicação. Existe apenas necessidade de garantir que o comprimento dos braços da pistola que suportam os elétrodos seja maior que 300 *mm*, para que a forqueta e o manipulador de perfis possam ser movimentados no seu interior.

A Figura 4.43 exemplifica um modelo 3*D* de uma pistola de soldadura comum.

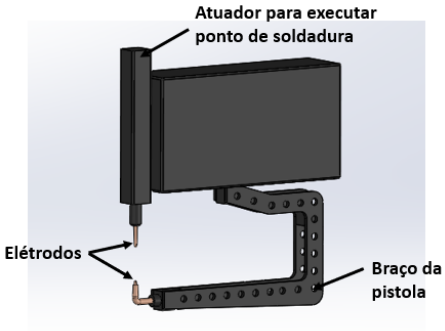


Figura 4.43 - Representação da pistola de soldadura.

A pistola de soldadura é posicionada na extremidade da carruagem de soldadura, sendo possível assegurar a soldadura de perfis em chapas de diâmetros mais pequenos, porque o conjunto da carruagem de soldadura é movimentado num nível superior ao tampo da mesa. Como se pode comprovar na Figura 4.44.

A unidade energética que é necessária para sustentar a soldadura é alojada no armário criado no suporte de soldadura que é mantido fixo.

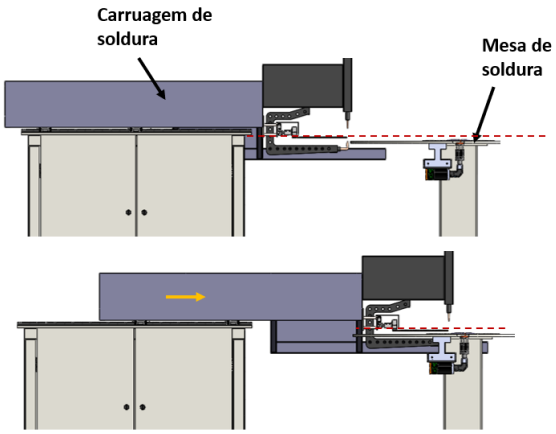


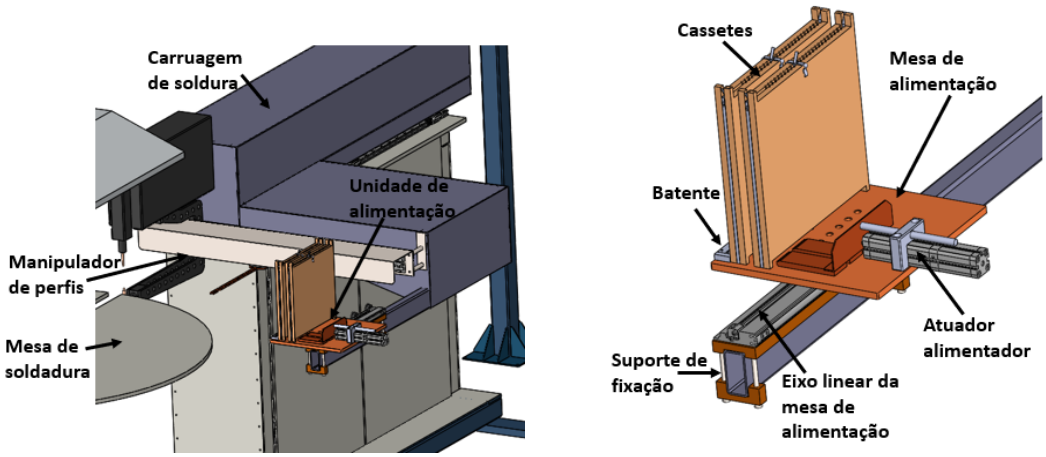
Figura 4.44 - Detalhe do movimento da carruagem de soldadura relativamente à mesa de soldadura.

4.2.2.2 Unidade de alimentação de perfis

A unidade de alimentação de perfis, como explicado anteriormente na solução de princípio, serve de alojamento às cassetes com perfis provenientes da unidade de corte.

Esta unidade é constituída pelos seguintes elementos, representados na Figura 4.45:

- mesa da unidade de alimentação de perfis;
- batente da mesa de alimentação;
- eixo linear pneumático para mesa de alimentação;
- cassetes;
- atuador alimentador.



(a) Posição da unidade de alimentação de perfis. (b) Unidade de alimentação de perfis.

Figura 4.45 - Unidade de alimentação de perfis.

Este conjunto é instalado sobre um braço estrutural rigidamente ligado à carruagem de soldadura através de um suporte apropriado, como representado na Figura 4.46.

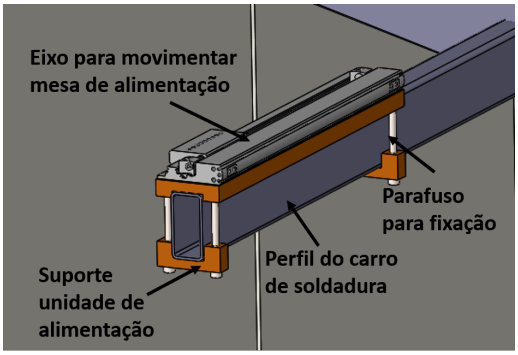


Figura 4.46 - Suporte de fixação da mesa de alimentação de perfis.

A mesa de alimentação de perfis é feita em alumínio e possui quatro furos apropriados (dois para cada cassete) onde irão encaixar os pinos das cassetes. Esta fixação das cassetes é diferente da fixação utilizada na unidade de corte, pois nesta última as cassetes apresentam os furos e a base os pinos.

Esta solução foi desenvolvida para que o operador não coloque as cassetes na posição errada, pois nesta unidade as cassetes tem de ser colocadas na sua posição invertida, para que os perfis possam cair livremente. Além disso os pinos apresentam também tamanhos diferentes para que as cassetes fiquem corretamente orientadas, de modo a que a face de início dos perfis esteja sempre do mesmo lado.

A Figura 4.47 ilustra duas perspetivas da mesa de alimentação.

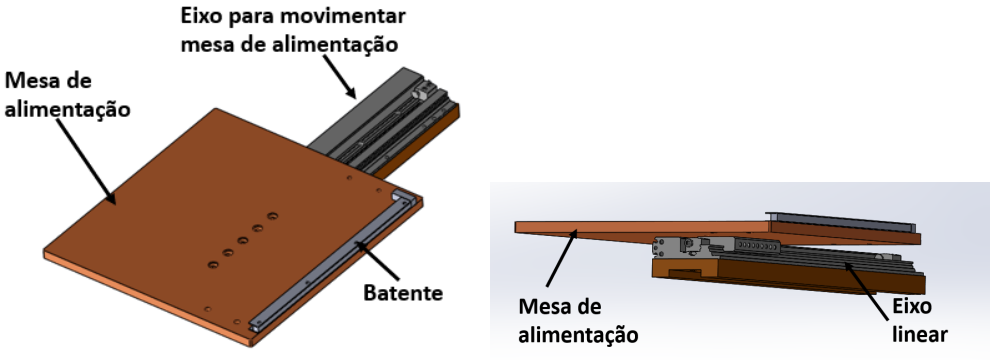
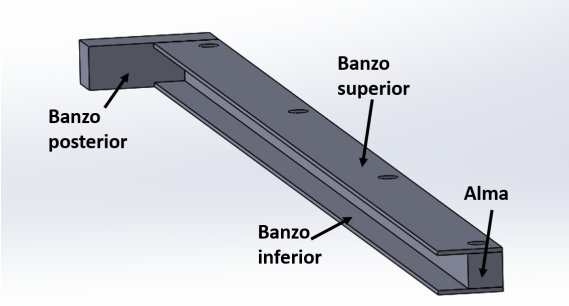
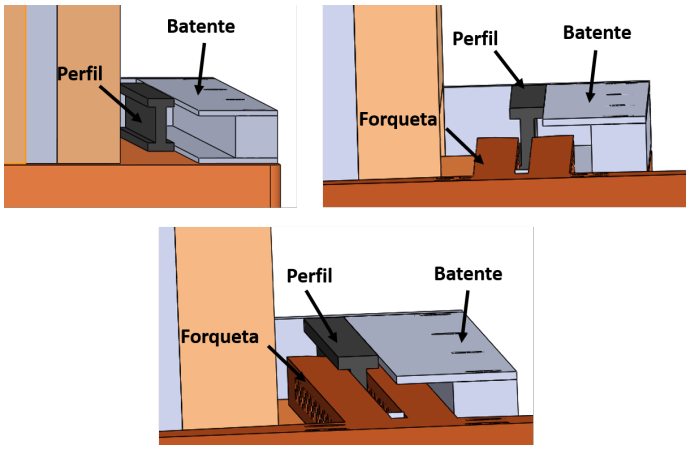


Figura 4.47 - Mesa de alimentação de perfis.

Esta mesa tem um batente, fixo por parafusos, para definir a posição final do perfil quando é empurrado. Este batente foi desenhado para que as abas do perfil sejam encostadas ao batente e a alma se encontre afastada deste para que a forqueta possa agarrar no perfil, como exemplificado na Figura 4.48.



(a) Detalhe do batente fixo para o perfil na mesa de alimentação.



(b) Detalhe da relação entre o batente, o perfil e a forqueta durante a inserção do perfil.

Figura 4.48 - Solução do batente da mesa de alimentação de perfis.

A inserção do perfil na forqueta é realizada através da translação da mesa de alimentação de perfis, como mencionado na solução de princípio. Deste modo, é utilizado um eixo linear pneumático, com guiamento de esferas, para movimentar a mesa de alimentação de perfis. As suas propriedades estão representas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Características do atuador responsável por mover a mesa de alimentação de perfis.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	18 mm
Curso	300 mm
Força de avanço/recuo	153 N
Velocidade de referência	50 mm/s
Tempo de mov.	6 s

É utilizado um atuador de 3 posições para empurrar o perfil desde as cassetes até ao batente fixo na mesa. Este atuador é igual ao atuador utilizado para empurrar o perfil para a zona de inserção de perfis nas cassetes, na unidade de corte, e as suas características estão apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Características do atuador que empurra os perfis desde as cassetes até ao batente.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito de três posições
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	25 mm
Curso 1	40 mm
Curso 2	100 mm
Força de avanço	295 N
Força de recuo	245 N
Velocidade de referência	30 mm/s
Tempo de mov.	4 s

Para a colocação das cassetes sobre a base de soldadura há necessidade de estas serem postas sobre o atuador, isto é, para colocar a cassete auxiliar é necessário que o atuador esteja na 2ª posição para que, deste modo, seja evitada a alimentação de dois perfis seguidos aquando do movimento do atuador.

A Figura 4.49 apresenta o atuador que realiza a alimentação dos perfis e o respetivo guiamento.

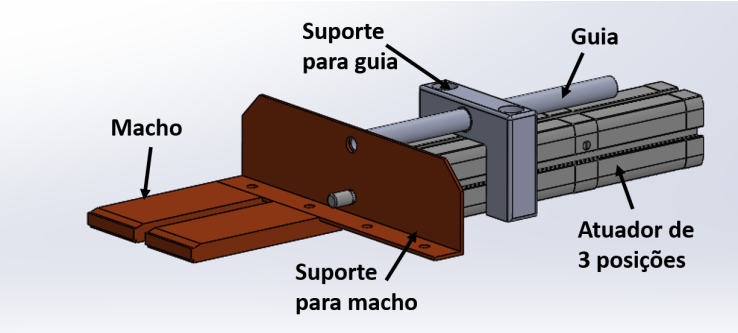
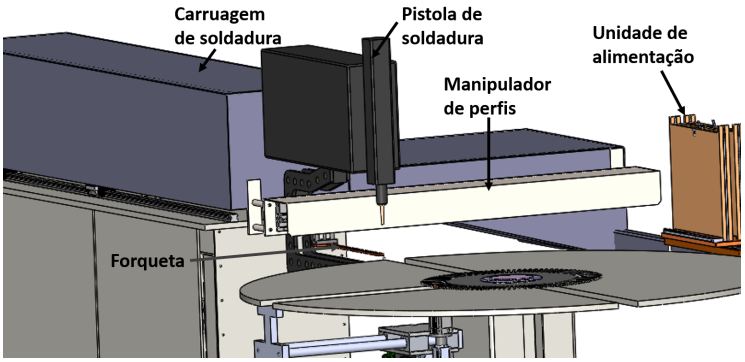


Figura 4.49 - Atuador alimentador de perfis.

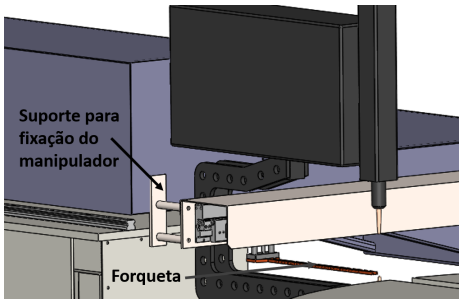
4.2.2.3 Manipulador de perfis

O manipulador de perfis tem a finalidade de transportar o perfil desde a unidade de alimentação de perfis até ao local de soldadura do perfil, sobre o dente da chapa.

Deste modo, este conjunto é fixo à carruagem de soldadura, passando pelo interior da pistola de soldadura para abranger as duas posições limite, devendo ficar orientado com os elétrodos da máquina de soldadura para a forqueta poder fixar o perfil durante a soldadura, como ilustrado na Figura 4.50.



(a) Vista de frente.



(b) Vista aproximada.

Figura 4.50 - Manipulador de perfis.

O manipulador, apresentado na Figura 4.51, é constituído pelos seguintes elementos:

- eixo linear pneumático;
- forqueta;
- atuador pneumático guiado para elevar a forqueta;
- atuador pneumático guiado para verificar a soldadura.

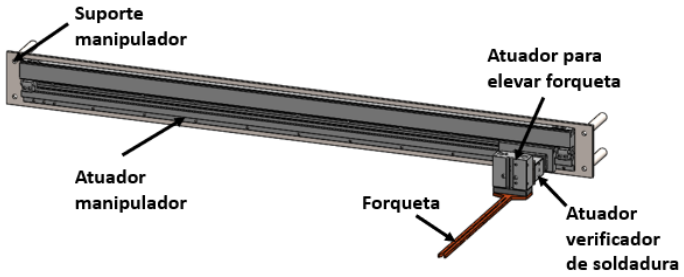


Figura 4.51 - Desenho de especificação do manipulador.

O eixo linear pneumático, com guia de esferas, é utilizado para transportar a forqueta desde a posição de inserção do perfil, que se encontra além do diâmetro da mesa de soldadura, até à posição central da mesa de soldadura alinhada com a pistola de soldadura.

Anteriormente foi previsto que o mecanismo que iria assegurar este movimento seria um eixo elétrico linear de correia. Contudo, após o estudo dessa aplicação, verificou-se que não era conveniente, pois ocupava um espaço demasiado grande e era demasiado robusto para as necessidades da aplicação em causa, porque apenas é necessário movimentar a forqueta entre duas posições limite fixas, não existindo posições intermédias.

Deste modo, o eixo linear pneumático que foi selecionado é rígido, compacto e versátil o suficiente para transportar o perfil e assegurar a precisão necessária, para posicionar corretamente o perfil. As características que este eixo tem estão apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Características do atuador responsável por movimentar a forqueta.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	18 mm
Curso	900 mm
Força de avanço/recuo	153 N
Velocidade de referência	150 mm/s
Tempo de ciclo	12 s

São usados dois atuadores pneumáticos com guiamento antigiro. Estes apresentam o mesmo diâmetro de êmbolo, mas cursos diferentes.

O primeiro atuador tem como função elevar a forqueta, para evitar que a esta colida com os perfis que já se encontram soldados às chapas.

O segundo atuador soluciona a necessidade de verificar se o 1º ponto de soldadura foi bem executado. Assim sendo, depois de ser executado o 1º ponto de soldadura, este atuador é avançado testando a boa fixação do ponto soldado.

A Tabela 4.15 ilustra as características previstas para estes atuadores.

A forqueta é construída a partir da maquinagem de uma barra de material e é aparafusada ao atuador responsável pela sua elevação que, por sua vez, está ligado por uma chapa ao atuador de verificação.

A Figura 4.52 ilustra os últimos dois atuadores na posição mais avançada.

Para que as faúlhas da soldadura não danifiquem o manipulador, é colocada uma chapa quinada com a configuração adequada que impossibilita que estas vão para esta zona, como é possível verificar na Figura 4.53.

Tabela 4.15 - Características do atuador responsável por elevar a forqueta e por verificar o ponto de soldadura.

Características	**Atuador para elevar forqueta**	**Atuador para verificar soldadura**
Solução construtiva	duplo efeito com guia antigiro	duplo efeito com guia antigiro
Energia	pneumática	pneumática
Diâmetro do êmbolo	16 *mm*	16 *mm*
Curso	20 *mm*	10 *mm*
Força de avanço	121 *N*	121 *N*
Força de recuo	90 *N*	90 *N*
Velocidade de referência	40 mm/s	3 mm/s
Tempo de mov.	0,5 *s*	3 *s*

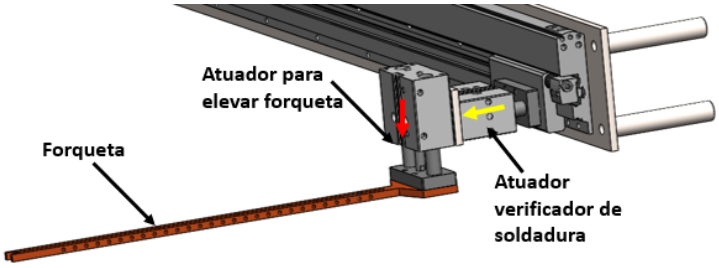
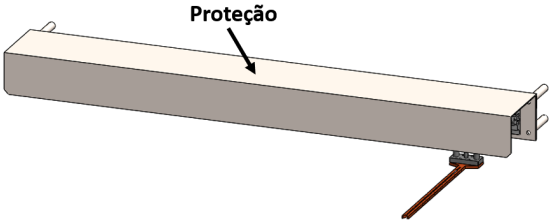
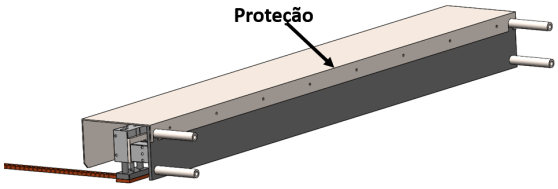


Figura 4.52 - Ilustração do atuador de elevação da forqueta e de verificação do 1º ponto de soldadura.



(a) Vista de frente.

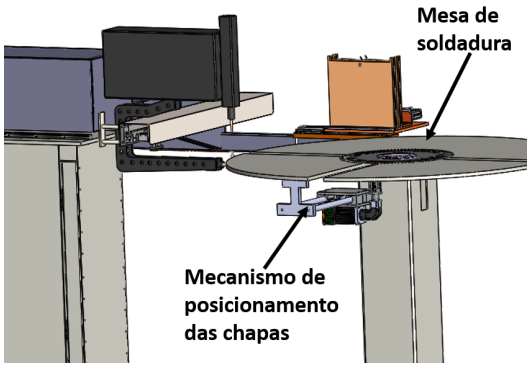


(b) Vista posterior.

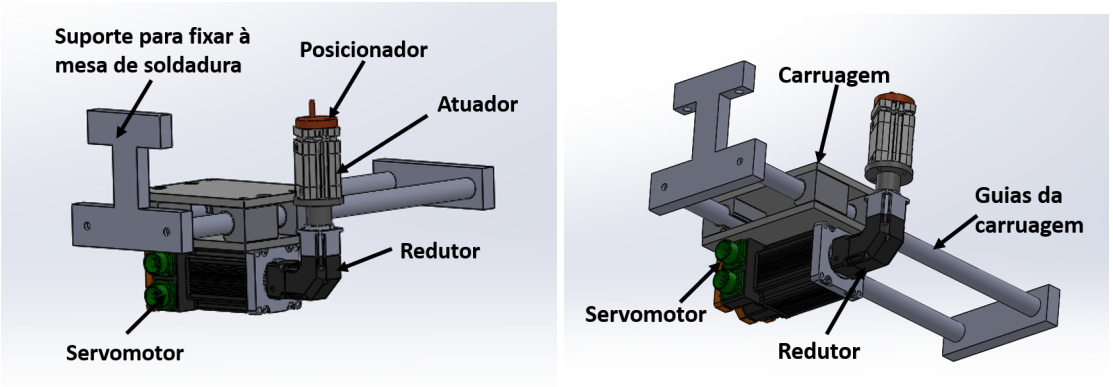
Figura 4.53 - Detalhe da chapa de proteção do manipulador.

4.2.3 Mecanismo de posicionamento das chapas

O mecanismo de posicionamento das chapas tem duas funções: rodar a chapa para uma nova posição de soldadura e posicionar corretamente o dente da chapa em relação aos elétrodos da máquina a cada movimento de rotação. Este mecanismo é fixo à mesa de soldadura e está representado na Figura 4.54.



(a) Mecanismo de posicionamento da chapa.



(b) Detalhe do mecanismo de posicionamento da chapa.

Figura 4.54 - Mecanismo de posicionamento da chapa.

Esta aplicação conta com um servomotor, acoplado a um redutor angular, que realiza uma redução suficiente para que a rotação da chapa seja feita de forma lenta.

A utilização de um servomotor deve-se ao facto de esta aplicação necessitar do conhecimento da posição para ter um controlo preciso de quanto deve rodar a chapa.

O redutor angular utilizado é uma solução compacta e permite criar um braço que retira o atuador da zona do rasgo, pois se isto não acontecesse seria mais difícil fixar este conjunto.

É utilizado um posicionador que apresenta um pino excêntrico que entra entre as ranhuras dos dentes e vai permitir arrastar a chapa aquando do movimento de rotação do movimento.

Para que o pino do posicionador possa ser colocado nas ranhuras, foi previsto um atuador que eleva o posicionador para rodar a chapa.

Este atuador deve apresentar um corpo pequeno mas, ao mesmo tempo, o diâmetro da circunferência que contém os furos de fixação do atuador deve ser maior que o diâmetro do veio da saída do redutor. Deve também gozar da propriedade de antigiro pois, se por algum motivo a haste do atuador rodar, a posição que foi inicialmente configurada nas relações do servomotor é perdida. As características que este atuador deve apresentar estão representadas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Características do atuador para elevar o posicionador.

Características	
Solução construtiva	duplo efeito
Energia	pneumática
Diâmetro do êmbolo	32 mm
Curso	25 mm
Força de avanço	483 N
Força de recuo	415 N
Velocidade	25 mm/s
Tempo de ciclo	2 s

O posicionador deve regressar sempre à posição inicial depois de rodar a chapa, sendo que para isso, é descido pelo atuador e o motor roda no sentido contrário.

Como é utilizado um servomotor, é possível medir a posição angular em que se encontra o pino e definir quanto é que este deve rodar em função do diâmetro da chapa e do ângulo de rotação entre dentes.

O conjunto do posicionador é colocado sobre uma carruagem, movida manualmente, que desliza sobre uns veios ao longo do raio da mesa de soldadura, sendo assim ajustada consoante o diâmetro da chapa.

Para ser conhecida a posição do pino posicionador, ao longo do diâmetro da mesa, é colocado um sensor de cabo.

A Figura 4.55 ilustra o elemento posicionador que foi desenvolvido e um exemplo da sua posição relativamente à chapa.

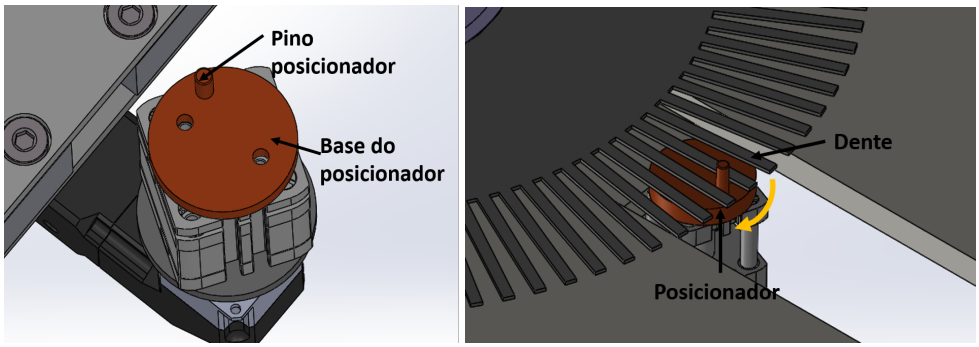


Figura 4.55 - Detalhe do posicionador do sistema de posicionamento das chapas.

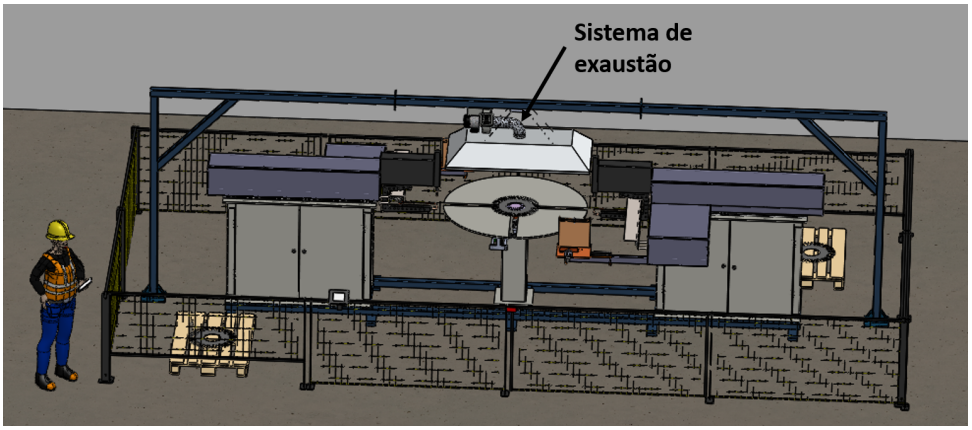
4.2.4 Sistema de exaustão de fumos

O sistema de exaustão de fumos tem como finalidade eliminar os fumos gerados durante a soldadura.

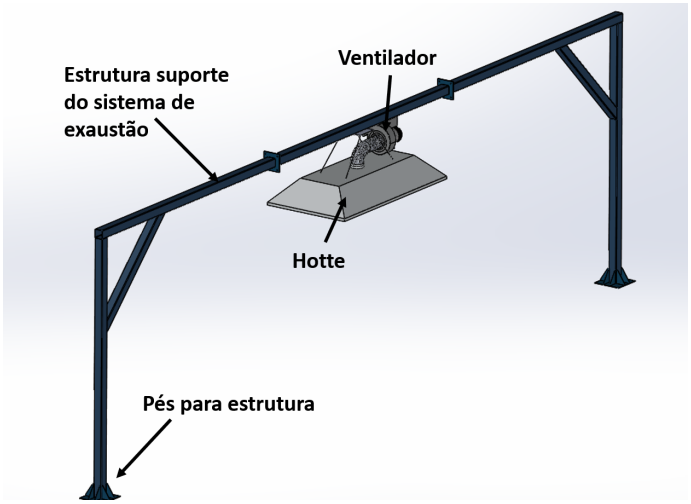
Este sistema conta com uma "hotte" de exaustão, um ventilador e uma estrutura que posiciona os elementos mencionados no centro da mesa de soldadura.

A estrutura é construída com perfis iguais aos da base da estrutura de soldadura e, devido ao seu elevado comprimento é constituída por três partes para ser facilmente montada e desmontada.

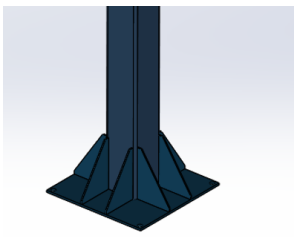
Na Figura 4.56 está reapresentado este sistema de exaustão e a ligação da estrutura de exaustão ao chão da fábrica.



(a) Vista global.



(b) Visão detalhada.



(c) Detalhe da ligação da estrutura do sistema de exaustão ao chão.

Figura 4.56 - Sistema de exaustão.

Neste caso, também é necessário cumprir as distâncias de segurança para que não ocorra esmagamento. Sendo assim, é mantida uma distância mínima de 500 *mm* entre a estrutura do sistema de exaustão e a carruagem de soldadura quando se encontra na posição mais recuada.

4.2.5 Proteções

Foram previstas barreiras de segurança em torno de toda a unidade através de um gradeamento rígido, existindo locais de acesso às pilhas das chapas (aberturas próprias no gradeamento) e para acesso do operador. As portas de acesso ao operador estão equipadas com fechaduras de segurança.

Na Figura 4.57 estão representadas as grades de proteção colocadas em volta da unidade de soldadura.

Nesta solução está ainda representada a localização de uma consola que servirá de interface entre o operador e a máquina.

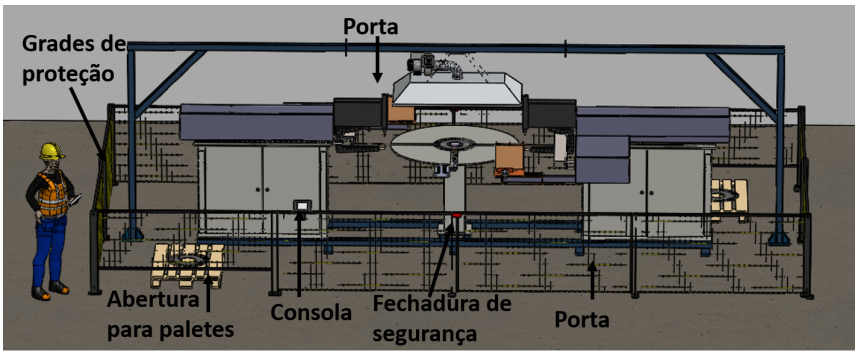


Figura 4.57 - Ilustração das grades de proteção.

4.2.6 Armazenamento de chapas

Estes lugares presentes no espaço da unidade de soldadura são reservados para alojar as chapas de rotor e de estator sem e com perfis, ou seja, antes e depois de ser executado o processo de soldadura dos perfis.

Para suportar as chapas são utilizadas umas paletes que depois são movimentadas por empilhadores, através das aberturas existentes nas barreiras de proteção.

Estes locais, por sua vez, necessitam de apresentar uma dimensão suficiente grande para que o operador possa manobrar as chapas sem dificuldades.

A Figura 4.58 mostra a posição das paletes que vão receber as chapas do rotor ou do estator.

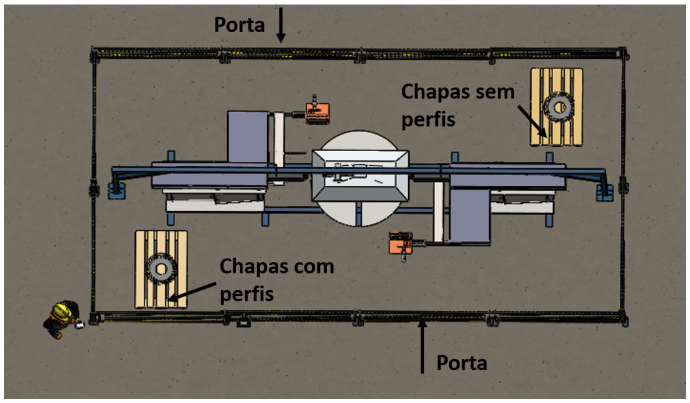


Figura 4.58 - Representação dos locais para empilhar chapas.

4.3 Conclusões

Ao longo deste Capítulo foram apresentadas as soluções desenvolvidas para a construção da nova solução automatizada para a produção de chapas de reforço equipadas do rotor e do estator.

Com o desenvolvimento desta solução foi possível reduzir o esforço humano envolvido no processo atual, sendo apenas necessária alguma colaboração por parte do operador.

Como nesta solução existem várias estações a funcionar em simultâneo, é possível aumentar a produtividade, diminuindo substancialmente o tempo de trabalho.

Deve ser salientado que as soluções desenvolvidas já se encontram num nível de otimização elevado, contudo estão sempre sujeitas a um melhoramento constante.

Apesar de serem apresentadas as soluções de acionamento, não implica que estas sejam as que serão aplicadas efetivamente aquando a construção da máquina, pois estas dependem do fabricante escolhido. No entanto, devem ser cumpridas as características mencionadas anteriormente.

Capítulo 5

Solução de comando

Este capítulo é dedicado à apresentação da solução de comando proposto para o equipamento concebido, para que sejam cumpridas adequadamente as funcionalidades atrás mencionadas.

Inicialmente, são expostos os requisitos associados a cada movimento e é apresentada a solução de comando proposta para a sua implementação.

Seguidamente, são apresentados os esquemas pneumáticos relativos às unidades de corte e de soldadura e os *Grafcets* comportamentais que foram realizados tendo em conta a sequência de movimentos que permitem uma melhor compreensão dos elementos envolventes.

Por fim, é feita uma análise temporal que contém os tempos de ciclo estimados para as várias etapas, sendo esta secção de grande importância uma vez que permite apreciar a eficácia da solução.

5.1 Especificação dos movimentos

Existem certos cuidados a ter perante a execução dos vários movimentos sendo necessário cumprir alguns requisitos como, por exemplo: deteção dos perfis e barras nos diferentes subconjuntos funcionais e verificação de alguns movimentos.

De seguida são apresentados os vários movimentos de cada unidade de trabalho.

5.1.1 Movimentos da unidade de corte

Neste processo de corte é necessário controlar todos os movimentos, desde a alimentação das barras até a inserção dos perfis nas cassetes, uma vez que esta unidade de produção é praticamente toda automatizada. Sendo apenas necessário que o operador coloque as barras e substitua as cassetes quando se encontram totalmente preenchidas.

Deste modo, são caracterizados de seguida os vários movimentos a contemplar nos vários conjuntos funcionais:

- *setup* inicial;
- alimentação das barras:
  - elevação das barras (**01**);
  - alimentação das barras (**02**);
  - sopro de ar antes do corte (**03**);
- operação de corte:
  - calcamento (**04**);
  - posicionamento do eixo linear para definição do comprimento do perfil (**05**);
  - elevação do batente que define o comprimento do perfil (**06**);
  - corte (**07-08**);
- 1ª rebarbagem:
  - rotação do batente angular móvel para perfil (**09**);
  - fixação do perfil (**10**);
  - rebarbagem (**11-12**);
  - transporte do perfil (**13**);
  - sopro de ar depois da rebarbagem (**14**);
- 2ª rebarbagem (**15-20**);
- armazenamento de perfis:
  - alimentação dos perfis para a zona de inserção (**21**);
  - inserção de perfis nas cassetes (**22**).

5.1.1.1 *Setup* inicial

Antes da execução de qualquer movimento, é necessário que o operador realize as seguintes ações:

- verificação da existência de barras na mesa elevatória;
- colocar cassetes vazias com a peça divisora na ranhura correspondente ao comprimento de perfil desejado;
- ajustar o macho do atuador alimentador em função do comprimento d perfil;
- verificar se os depósitos das sobras e limalhas se encontram devidamente preparados;

- analisar se a ferramenta de corte e de rebarbagem se encontram nas devidas condições;
- definir o comprimento do perfil.

A primeira operação consiste no apuramento da existência de barras na mesa elevatória, podendo suceder os seguintes episódios:

- não existir nenhuma barra na mesa elevatória, logo é necessário inserir barras;
- existirem algumas barras e ser necessário inserir mais barras;
- existirem algumas barras e não ser necessário inserir mais barras.

Sempre que é necessário colocar barras na mesa elevatória, esta deve-se encontrar na posição mais baixa. No caso de esta não se encontrar nesta posição, o operador deve aceder à opção manual de funcionamento da máquina e baixar a mesa para inserir as barras que achar necessário.

Após a mesa elevatória apresentar as devidas barras, o operador deve designar qual o comprimento de perfil a cortar e o número de perfis requeridos, para que desta forma só sejam alimentadas as barras necessárias e mesmo durante o corte de uma barra não serem cortados mais perfis do que os necessários.

Por fim, para o operador iniciar a máquina deve ser garantido que não existe nenhum perfil ao longo dos vários postos da unidade de corte. Esta inspeção deve ser feita pelo operador e também pelos vários sensores que foram dispostos ao longo da unidade de corte e que permitem analisar a existência de perfis, que por algum motivo ficaram presos.

Também tem de ser garantido que as portas que impedem o acesso ao espaço entre a parede e a máquina estão devidamente fechadas.

Desta maneira estão reunidas as condições necessárias à iniciação de funcionamento de corte.

5.1.1.2 Elevação das barras

O movimento de elevação da mesa elevatória ($M01$), representado na Figura 5.1, tem como principal objetivo elevar as barras para uma dada posição para depois serem alimentadas para a rampa 1. Cada movimento de elevação deve apresentar um curso de 10 *mm*, na vertical, que corresponde à altura de uma barra.

Como já mencionado anteriormente, a elevação da mesa é executada por meio de um atuador elétrico com fuso, acionado por um motor elétrico. Este atuador precisa de conter dois detetores de fim de curso para serem conhecidas as posições limite da mesa elevatória.

Este movimento deve partir de uma posição inicial, que é a posição mais recuada, à qual corresponde a ativação de um detetor de fim de curso (S011).

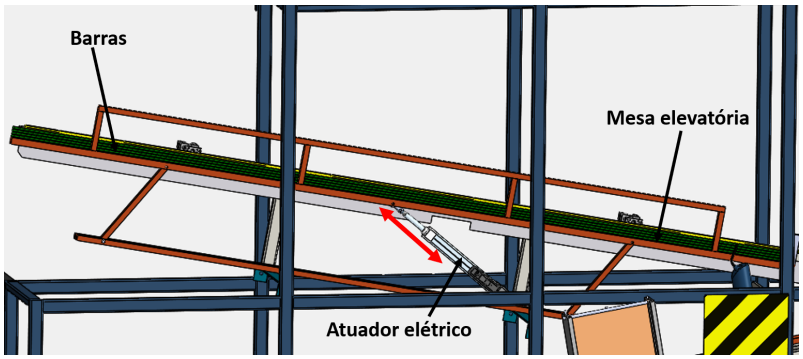


Figura 5.1 - Movimento da mesa elevatória.

Uma vez colocadas as barras na mesa, pelo operador, deve ser dada uma ordem para elevação da mesa até à posição em que a barra mais superior esteja na posição de ser arrastada.

Contudo, antes de qualquer elevação da mesa elevatória tem de ser garantido que a garra para alimentar as barras se encontra na posição mais avançada, para que aquando da elevação da mesa elevatória a barra seja inserida no meio da garra, para posteriormente ser arrastada.

Embora o movimento do atuador seja a velocidade constante, a própria elevação da mesa realiza-se a velocidade variável uma vez que esta é feita através de um braço articulado. Assim, é necessário realizar incrementos de posição do atuador diferentes para a elevação de cada incremento de 10 *mm* correspondente à altura de cada barra.

Por não existir conhecimento da posição, há que considerar a existência de um detetor específico (indutivo – $S1$) para detetar que o banzo superior de uma barra atingiu a posição que permite o seu arrasto. Uma vez dada a ordem para subida a mesa será elevada até atingir o detetor ($S1$), ficando parada e é dada autorização para que o arrasto seja realizado.

Quando a totalidade da barra for cortada, o atuador de arrasto volta à sua posição avançado e ocorre uma nova elevação de barra.

Caso o detetor de fim de curso ($S012$) do atuador seja atingido sem ser atingido o detetor de barra ($S1$), significa que não existe mais nenhuma barra na mesa e o movimento de descida deve ser de imediado realizado, até à posição inicial, dando-se informação de mesa "sem barra".

Como durante o corte de uma barra a mesa não está impedida de descer, o operador poderá a qualquer momento tomar a decisão de ordenar um movimento de descida da mesa para colocação de novas barras. No entanto, qualquer movimento de subida da mesa deverá sempre ser "automático", isto é, ser feito somente após o atuador de arrasto estar em posição avançada.

Sendo o curso do movimento de cerca de 100 *mm*, o curso do atuador 200 *mm* e a sua velocidade 10 mm/s, então a mesa desloca-se a uma velocidade média de 5 mm/s. Supondo que o atuador é capaz de parar, ao ser ativado o detetor, em menos de 0,1 s, este poderá ter um sobrecurso de 0,5 *mm*. Este eventual sobrecurso é perfeitamente compatível com a folga prevista na peça de

arrasto relativamente à barra.

5.1.1.3 Alimentação das barras

O movimento de alimentação das barras ($M02$) é executado por dois atuadores pneumáticos ($A021$ e $A022$), com movimentos simultâneos que, com auxílio de uma garra comum, arrastam a barra desde a mesa elevatória até ao centro da rampa 1, onde a barra inicia o movimento de descida devido à força da gravidade.

A Figura 5.2 apresenta o movimento dos atuadores responsáveis pela alimentação da barra.

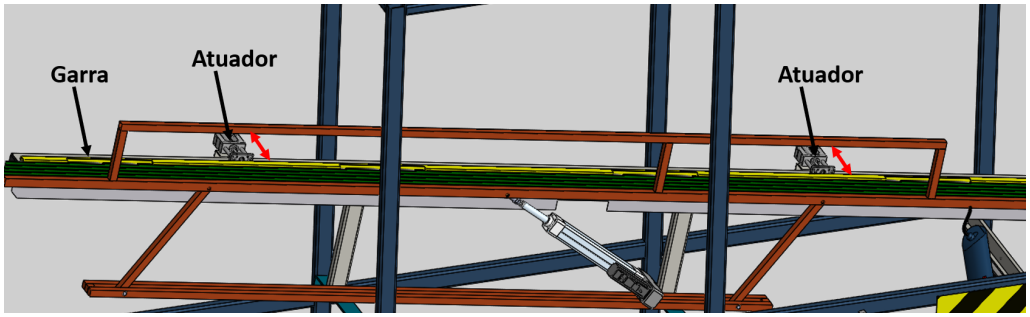


Figura 5.2 - Movimento referente à alimentação da barra.

O comando dos atuadores pneumáticos é executado por uma válvula monoestável 5/2 ($V02$) que garante que os atuadores estão normalmente numa posição recuada, que é a posição em que a garra está a maioria do tempo.

Cada um dos atuadores pneumáticos tem dois detetores de fim de curso que permitem identificar se a garra está na posição mais avançada ou na posição mais recuada.

A velocidade de avanço e recuo é controlada por dois estranguladores de caudal unidirecionais ($VE021$ e $VE022$), colocados em *meter-out*.

A Figura 5.3 ilustra o esquema pneumático relativamente a este movimento.

Como referido, sempre que é necessário uma nova barra a garra é avançada pelos atuadores através do acionamento da válvula $V02$ e a mesa elevatória sobe de forma a inserir a barra no meio da garra. A posição avançada da garra é assegurada pelos detetores de fim de curso $S0212$ e $S0222$.

Após a deteção da barra pelo sensor $S1$, esta é arrastada pela garra, sendo que os atuadores recuam até os segundos detetores de fim de curso de cada atuador, $S0211$ e $S0221$, serem ativados.

A partir deste ponto, a barra inicia o movimento de descida em direção ao posto de corte devido à força da gravidade.

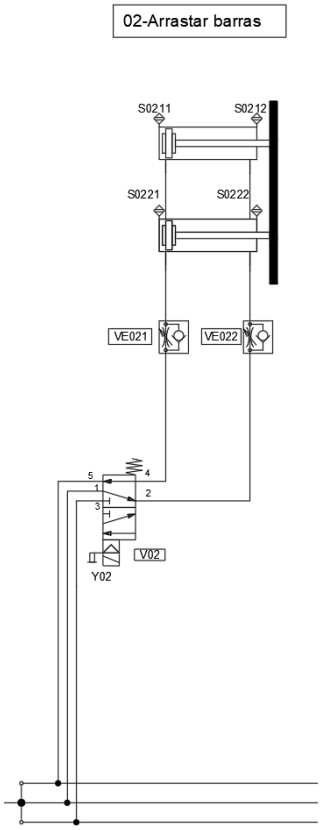


Figura 5.3 - Esquema pneumático referente ao movimento de alimentação as barras.

Os atuadores devem ser mantidos recuados até nova ordem de alimentação de uma barra. Esta ordem é emitida quando o corte da barra em curso chegar ao fim, sendo que a garra é avançada para receber a próxima barra.

5.1.1.4 Sopro de ar antes do primeiro calcador

Estes bicos pneumáticos permitem emitir um sopro de ar que ajuda o movimento de descida do perfil antes do 1º calcador.

Estes, por sua vez, são comandados por uma válvula monoestável 5/2 ($V03$), que deve ser atuada sempre que uma barra efetuar um movimento de descida.

Dada a simplicidade do seu esquema pneumático, este último é apenas apresentado no Anexo B.

5.1.1.5 Calcamento

As principais funções dos calcadores são: apertar a barra durante a operação de corte, mantendo-a fixa e sem movimentos indesejáveis, e travar o movimento de descida da barra para que esta não

colida com demasiada força no batente que define o comprimento do perfil. Além disto, estes devem identificar a existência de sobras.

Na Figura 5.4 está representado o movimento do 1º calcador ($M04$), posicionado imediatamente antes do corte, que se encontra na posição mais recuada.

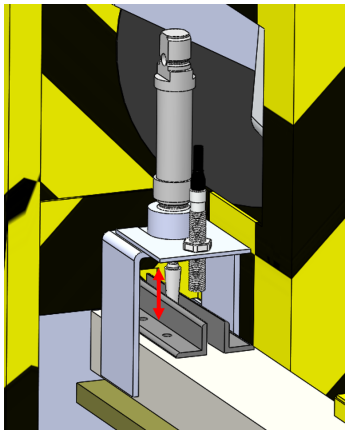


Figura 5.4 - Movimento do 1º calcador.

Os calcadores são compostos por dois atuadores pneumáticos ($A041$ e $A042$) que apresentam movimentos independentes, mas comandados de igual forma, pois são ambos acionados por válvulas monoestáveis 5/2 ($V041$ e $V042$) que asseguram que estes se encontram numa posição normalmente avançada. Esta posição corresponde à posição em que o calcador realiza a função de batente, impedindo que a barra desça de forma descontrolada.

A velocidade de cada um dos movimentos é definida por válvulas fluxométricas em *meter-out*, e as posições limite identificadas por detetores de fim de curso magnéticos ($S0411$, $S0412$, $S0421$ e $S0422$), como apresentado na Figura 5.5.

Estes detetores de fim de curso permitem identificar as seguintes condições:

- **detetor de posição avançada ativado (*S0412* e *S0422*)** - o atuador encontra-se na posição mais avançada, logo significa que não está a pressionar nenhuma barra;
- **detetor de posição recuada ativado (*S0411* e *S0421*)** - o atuador encontra-se na posição mais recuada, logo significa que a barra pode descer livremente para além do calcador;
- **detetores não ativados e válvula não comandada** - o atuador encontra-se a pressionar a barra.
- **detetores não ativados e válvula comandada** - erro, ou situação transitória.

Para deter o movimento de descida da barra é colocado o 1º calcador na posição mais avançada que serve como batente móvel 1, isto é, irá amortecer a velocidade de descida da barra, para que

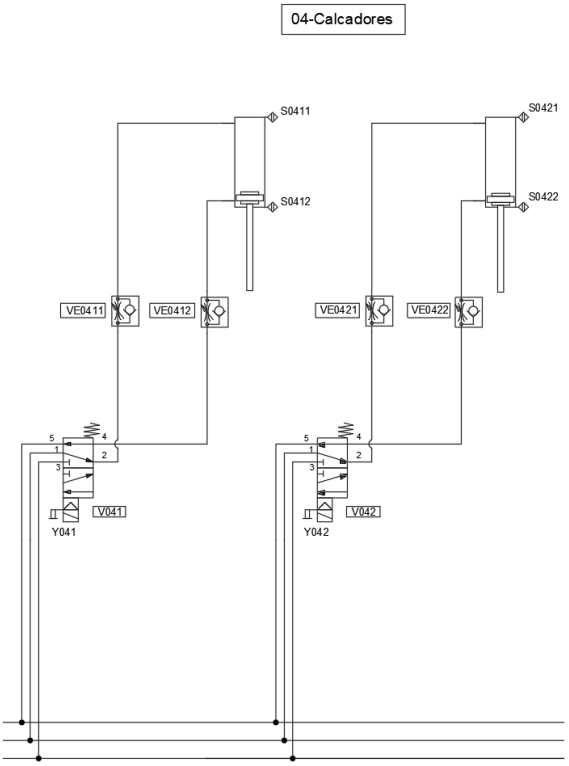


Figura 5.5 - Esquema pneumático referente ao movimento dos calcadores.

deste modo o eixo linear não sofra impactos demasiados fortes. Quando a barra encostar ao 1º calcador é detetada pelo sensor indutivo ($S2$).

Por fim, os calcadores são responsáveis por verificar se é possível executar mais cortes numa barra ou se esta é considerada como sobra.

O reconhecimento de sobras ocorre quando são verificadas as seguintes situações:

- o 1º calcador atinge o fim de curso correspondente à posição mais avançada ($S0412$ ativado) e o 2º calcador encontra-se a fixar a barra, isto é, nenhum dos sensores ($S0421$ e $S0422$) está ativado;
- a barra está encostada ao batente que define o comprimento do perfil, mas nenhum dos calcadores está a fixar a barra, isto é, os detetores de fim de curso correspondentes à posição mais avançada são ativados.

Se algumas destas situações for verificada, tal significa que a barra apresenta um comprimento demasiado pequeno relativamente ao comprimento de perfil predefinido, logo será considerada a barra como sobra.

Futuramente, quando existir necessidade de cortar perfis mais pequenos, as sobras podem ser inseridas na rampa de descida e serem cortadas.

Os calcadores devem então iniciar a sua sequência de funcionamento normalmente avançados, sendo este facto verificado pelos respetivos detetores de fim de curso.

Após a alimentação da barra esta inicia o movimento de descida e irá "chocar" contra 1º calcador. Quando o sensor $S2$ (junto ao 1º calcador) detetar a barra, ambos os calcadores são elevados para a posição mais recuada, possibilitando que a barra continue o movimento de descida. Antes de os calcadores serem elevados, tem de ser verificado se a máquina de corte está na posição mais elevada, para que a barra não choque contra esta, e o batente que define o comprimento do perfil na posição mais avançada.

Os atuadores são avançados para fixar a barra após o tempo de descida da barra, previamente estipulado, até ao batente que define o comprimento do perfil, de modo a ser realizado o corte.

Após executado o corte, o 2º calcador é elevado e o perfil inicia o movimento de descida para a estação de rebarbagem. Contudo, este calcador só pode ser elevado se existirem condições para receber o perfil no 1º dispositivo de rebarbagem.

Quando o perfil for detetado pelo sensor $S3$, junto ao batente angular móvel do 1º dispositivo de rebarbagem, e o batente que define o comprimento do perfil voltar para a posição mais avançada, o 1º calcador é recuado e a barra desce mais um comprimento, sendo os calcadores novamente avançados para ser cortado o próximo perfil.

Quando é detetada uma sobra, ambos os calcadores são elevados, bem como o batente que define o comprimento do perfil. O batente angular móvel da rampa 1 é igualmente rodado para possibilitar a passagem da sobra para o depósito respetivo.

5.1.1.6 Posicionamento do eixo linear

Este movimento permite definir o comprimento do perfil a cortar. É executado por eixo elétrico linear de correia, acionado por um servomotor ($A05$) que permite garantir um correto posicionamento do batente ao longo do seu curso.

A Figura 5.6 ilustra o sistema de ajuste linear automático do comprimento do perfil com representação do movimento do eixo linear.

O comprimento do perfil é definido pelo operador antes da máquina ser colocada em funcionamento, como referido anteriormente. Após a iniciação da máquina, o servomotor é acionado e faz mover a carruagem do eixo linear para a devida posição.

O servomotor deve ser controlado em posição, ou seja, irá funcionar em função das diferentes posições que permitem definir os vários comprimentos dos perfis.

Para um correto funcionamento do servomotor tem de ser selecionado um *driver* que permita controlar adequadamente a posição do batente. O *driver* a utilizar deve ser do mesmo fabricante que o servomotor.

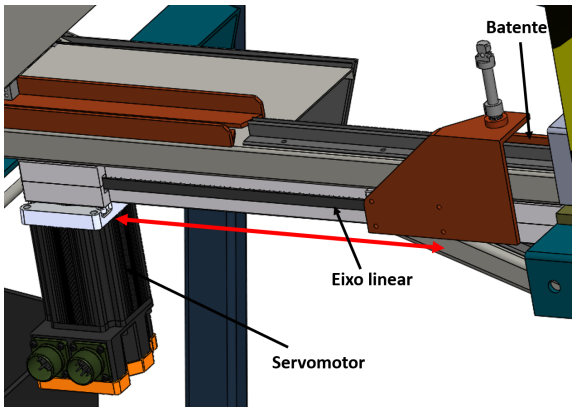


Figura 5.6 - Movimento do eixo linear.

O eixo linear é mantido numa dada posição até ser declarado um novo comprimento de perfil sendo, nesse momento, deslocado para a nova posição ficando nessa posição até ser pedido um novo comprimento. Isto significa que este eixo poderá estar numa posição fixa durante um elevado tempo. Assim sendo, o servomotor deve possuir um travão mecânico associado.

Como para realizar o ajuste do comprimento do perfil é necessário transportar o batente, é obrigatório que este último seja elevado antes da carruagem do eixo linear se movimentar. Quando for atingida a devida posição o batente é novamente avançado para a sua posição normal.

5.1.1.7 Elevação do batente que define o comprimento do perfil

Como o batente que define o comprimento do perfil se encontra no meio da rampa 2, é necessário que este seja movido verticalmente para que o perfil, após ser cortado, possa continuar o movimento de descida para a rebarbagem e para ser redefinida a posição deste, através do movimento do eixo linear para um novo comprimento de perfil.

A Figura 5.7 ilustra o movimento do atuador ($A06$) que eleva o batente que define o comprimento do perfil. Nesta figura o batente encontra-se na posição mais avançada.

O batente é roscado na haste de um atuador pneumático de simples efeito, normalmente avançado. Foi preferido este tipo de atuador para evitar que, no caso de falha de energia pneumática, o batente seja mantido na posição mais avançada, impedindo que desta forma nenhuma barra desça para lá do batente. Por outro lado, sendo o atuador de simples efeito ele possui uma força reduzida na sua posição mais avançada, a que corresponderá o batente estar apoiado sobre a superfície da rampa 2, fazendo uma leve pressão de contacto.

O atuador possui dois detetores de fim de curso ($S061$ e $S062$) que permitem identificar se o atuador se encontra na posição recuada ou avançada, validando assim a hipótese de receber, ou não, a barra.

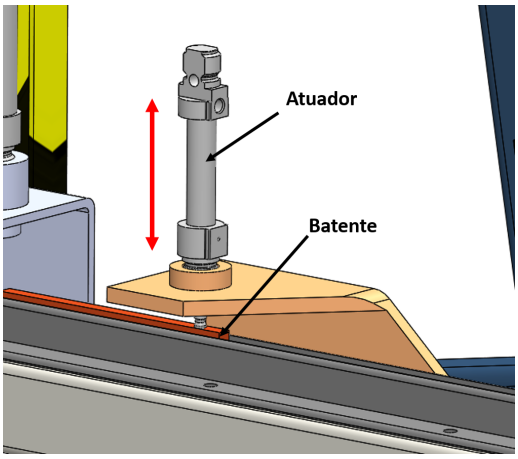


Figura 5.7 - Movimento de elevação do batente.

Para ajuste da velocidade de subida e de descida do batente, são colocadas duas válvulas fluxométricas unidirecionais, em série mas invertidas, que permitem controlar o caudal que entra e sai da câmara secundária do atuador.

O comando pneumático é executado por uma válvula direcional 5/2 monoestável ($V06$) que se encontra representada na Figura 5.8.

Ao movimento de elevação deste atuador estão associados bicos pneumáticos, que irão auxiliar o movimento de descida do perfil em direção ao 1º dispositivo de rebarbagem. A estes bicos está associado um estrangulador ($VE063$) que permite ajustar a intensidade do sopro.

Consequentemente, o atuador deve encontrar-se normalmente avançado, sendo apenas elevado, com atuação da válvula $V06$, após ter terminado o corte do perfil ou ser identificada uma sobra, para que estes prossigam para a próxima estação de trabalho.

Os bicos pneumáticos são também postos em funcionamento fazendo vibrar o perfil de modo a que este continue a descer, impedindo que fique preso.

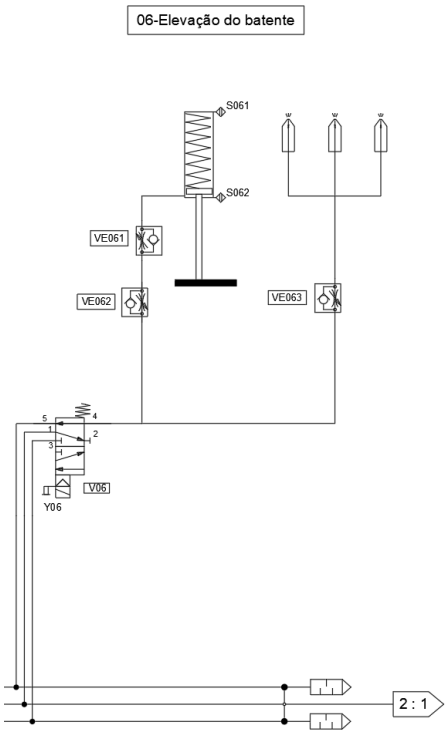


Figura 5.8 - Esquema pneumático referente ao movimento de elevação do batente.

Antes de o batente ser elevado para deixar passar o perfil acabado de cortar, é necessário verificar se o 1º dispositivo de rebarbagem está pronto para receber este perfil.

No caso da identificação de uma sobra, a garra pneumática deve apresentar os "dedos" afastados e o batente de fim da rampa deve estar rodado de forma a que a sobra caia no depósito.

O avanço do batente dá-se após o reconhecimento do perfil no 1^{o} dispositivo rebarbagem pelo sensor indutivo $S3$ colocado no batente angular móvel, sendo mantido nesta posição até nova ordem de elevação.

Relativamente ao ajuste do comprimento do perfil, o batente encontra-se na posição avançada e deve ser elevado antes do acionamento do eixo linear, mantendo-se na posição recuada até terminar o movimento do eixo linear. Neste momento, o batente é avançado voltando à posição normal.

5.1.1.8 Corte

O corte dos perfis é executado por uma máquina de corte comum por disco que é basculada por um atuador pneumático.

Deste modo para a realização do corte existem dois acionamentos:

- ligar a máquina de corte;
- atuar o atuador pneumático de basculamento.

Na Figura 5.9 são representados os movimentos que a máquina de corte executa, o movimento de rotação do disco ($A07$) e o movimento basculante ($A08$) que é executado pelo atuador pneumático.

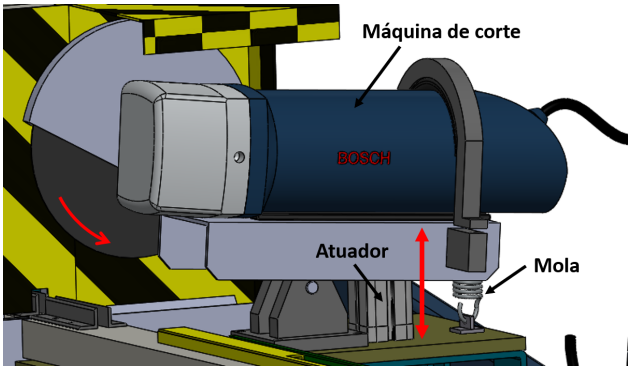


Figura 5.9 - Movimentos da máquina de corte.

Para que a máquina de corte seja comandada e controlada remotamente, o seu interruptor *on/off* deve ser mantido sempre na posição *on*, para que a máquina possa ser ligada e desligada, antes e depois do corte. Esta necessita de ser ligada antes de ser executado o movimento de descida.

O atuador utilizado para o basculamento é um atuador pneumático de duplo efeito que deve ser mantido, normalmente, na posição recuada, sendo utilizado para esse fim, uma válvula 5/2 monoestável ($V08$) que, em caso de falha de comando elétrico, garante que o atuador esteja recuado.

No caso de falha de energia pneumática durante o corte, a máquina irá sempre regressar à posição mais recuada, pois o recuo da máquina de corte é assegurado por uma mola a ela acoplada.

O atuador deve conter dois detetores de fim de curso ($S081$ e $S082$), para serem detetadas as suas posições e, ainda, duas válvulas estranguladoras em *meter in* para afinar a velocidade do movimento de avanço e de recuo do corte. Apesar do recuo não ser executado pelo atuador, o estrangulador irá diminuir a velocidade de recuo deste, que por sua vez se opõe ao movimento de recuo da mola.

Ao longo do tempo, com os sucessivos números de cortes, o disco de corte vai-se degradando tendo de ser substituído. Para ser conhecida a altura ideal da sua substituição são contados os cortes realizados e, ao fim de um determinado número de cortes, a máquina emite um aviso para ser trocado o disco.

Além deste método também foi incorporado um transdutor de pressão na câmara do atuador pneumático de basculamento, que se encontra a ser sujeita a pressão durante o corte, sendo assim, possível avaliar a qualidade do corte.

Associado ao movimento de descida do corte estão colocados bicos pneumáticos que permitem eliminar as limalhas resultantes do corte.

A Figura 5.10 apresenta o esquema pneumático referente a este movimento.

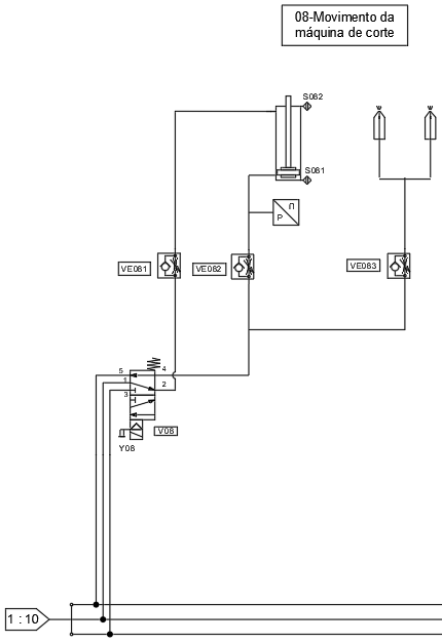


Figura 5.10 - Esquema pneumático referente ao movimento da máquina de corte.

O conjunto da máquina de corte deve ser mantido sempre recuado, sendo que esta posição é verificada pelo detetor de fim de curso do atuador ($S081$).

O corte só é executado quando a barra estiver fixa pelos dois calcadores. Quando isto se verificar, existe uma ordem de corte e a máquina de corte é ligada, seguindo-se da realização do movimento do corte com atuação do atuador pneumático.

Quando o atuador atingir o detetor de fim de curso correspondente à posição mais avançada, $S082$, significa que o corte já foi executado e deve ser realizado o movimento de recuo. Depois de o conjunto se encontrar completamente recuado ($S081$ ativado) a máquina de corte é desligada, ficando a partir deste momento, à espera de uma nova ordem de corte que irá acontecer repetitivamente até que seja completado o número de perfis necessários.

O momento em que o número de perfis é completado pode corresponder a duas situações:

- a barra é terminada, podendo existir ou não sobra;
- a barra não é terminada, ficando com um comprimento considerável por cortar.

Nesta última situação, a barra irá deslocar-se até encostar no 2^o calcador. Para isto, o 2^o calcador deve ser mantido na sua posição avançada (posição normal) e o 1^o calcador é elevado para que a barra desça, passado algum tempo o 1^o calcador avança novamente, fixando a garra até nova ordem.

5.1.1.9 Rotação do batente angular móvel para perfil

O movimento do batente angular móvel é o primeiro movimento a ser realizado no processo de rebarbagem.

Este batente é utilizado para garantir que o perfil desce até à posição de rebarbagem para que, de seguida, seja fixo pela garra pneumática, pois sem este batente o perfil iria continuar a descer a rampa de descida e iria cair no depósito das sobras.

O batente tem um movimento angular realizado por um braço associado a um atuador angular pneumático ($A09$) que executa um movimento de cerca 90^o. Este atuador deve ser capaz de manter, normalmente, o batente na posição alinhada com a rampa de descida.

A Figura 5.11 ilustra o batente posicionado na posição normal.

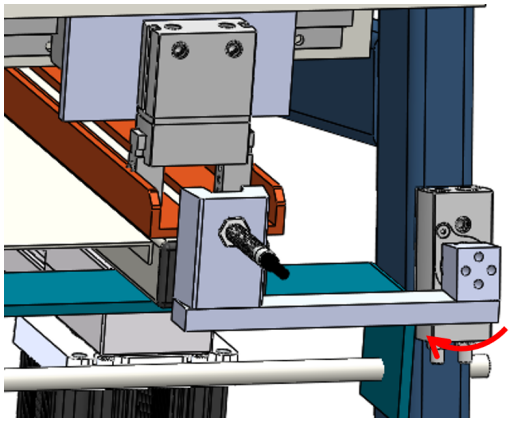


Figura 5.11 - Movimento de rotação do batente de fim da rampa.

Para este efeito é utilizada uma válvula monoestável 5/2 ($V09$) que, na falha de comando elétrico, mantém o atuador na posição desejada impedindo que, de alguma forma, algum perfil caia para o depósito.

Para ajustar a velocidade angular, são colocados dois estranguladores que limitam o caudal de ar a passar, diminuindo assim a velocidade.

Devem ainda existir dois detetores magnéticos de posição ($S091$ e $S092$) que permitam identificar a posição em que se encontra o batente.

Todos este elementos de comando pneumáticos estão representados na Figura 5.12.

Como mostrado na solução de construção este batente tem associado um sensor indutivo $S3$, que deteta quando o perfil termina o movimento de descida.

O batente angular móvel da rampa 2 encontra-se sempre na posição superior, de modo a poder receber e deter o perfil. Esta posição pode ser verificada através do detetor de posição do atuador.

O batente deve ser rodado em duas situações: para permitir passar um perfil para ser rebarbado e para que uma sobra caia para o depósito.

Relativamente a rebarbar um perfil, o batente só pode ser rodado 90º quando for detetado o perfil pelo sensor $S3$ e a garra pneumática se encontrar a fixar o perfil. Nesse instante, o batente é rodado através da atuação da válvula $V09$.

O batente deve voltar à sua posição normal quando for terminada a operação de rebarbagem.

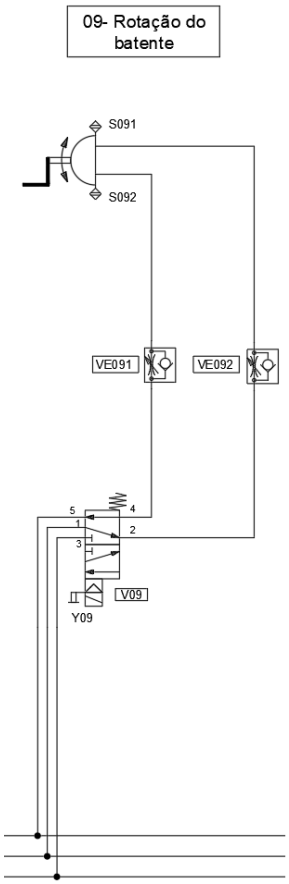


Figura 5.12 - Esquema pneumático referente à rotação do batente angular móvel da rampa 2.

Em relação às sobras, o batente é rodado logo após a identificação destas, ao mesmo tempo que é elevado o batente que define o comprimento do perfil, são elevados os calcadores e é aberta a garra pneumática. O batente regressa à posição inicial ao fim do tempo estimado que a sobra demora a cair no depósito.

5.1.1.10 Fixação do perfil

A garra pneumática desempenha um papel muito importante, uma vez que é responsável por manter o perfil fixo durante o processo de rebarbagem.

A Figura 5.13 ilustra a garra pneumática ($A10$) selecionada, que é constituída por dois dedos que permitem um maior alcance da garra ao longo do comprimento do perfil.

O comando da garra é realizado por uma válvula monoestável 5/2 ($V10$), que garante que esta é mantida normalmente na posição fechada. Esta é uma posição preferível porque se falhar

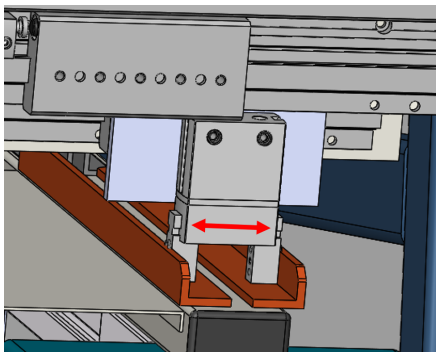


Figura 5.13 - Ilustração da atuação da garra pneumática.

o comando é garantido que a garra mantém o perfil fixo ou, no caso de esta se encontrar aberta fecha, e impede que um perfil ou uma barra, se for caso disso, desçam ao longo da rampa 2.

O conjunto da garra conta ainda com dois detetores de fim de curso ($S101$ e $S102$) que permitem conhecer a posição da garra. O ajuste da velocidade de abertura e fecho da garra pneumática é feito por dois estranguladores unidirecionais, de modo a evitar movimentos demasiado bruscos.

A Figura 5.14 é uma parte do esquema pneumático global da unidade de corte onde está representado o comando da garra pneumática utilizada para fixar o perfil, e que se encontra representada sobre o atuador responsável pelo seu transporte

Os "dedos" da garra pneumática podem ocupar diferentes posições, que correspondem a fixar ou não o perfil:

- **garra fechada** ($S102$ ativado) - nenhum perfil fixo;
- **garra aberta** ($S101$ ativado) - perfil livre para descer;
- **garra numa posição intermédia** (nenhum dos detores ativados e válvula $V10$ comandada) - garra a fixar perfil.

Ao longo do processo de corte a garra encontra-se normalmente fechada e só deve abrir quando for necessário passar um perfil para ser rebarbado ou uma sobra.

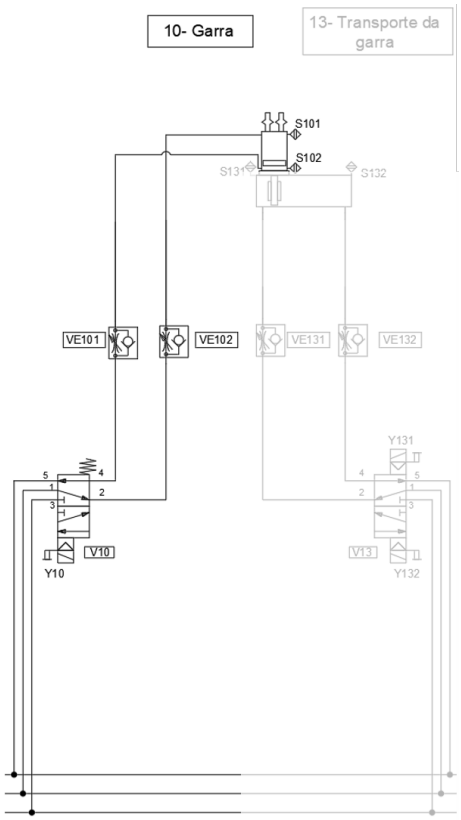


Figura 5.14 - Esquema de comando pneumático da garra.

Desta forma, para admitir um perfil para ser rebarbado, a garra pneumática abre e só fecha novamente quando o sensor indutivo ($S3$), que deteta o perfil encostado ao batente, for ativado.

A garra mantém o perfil fixo durante todo o processo de rebarbagem, e só larga o perfil, isto é, abre os "dedos", quando este for transportado para ser largado na rampa 3, o que ocorre quando o atuador transportador atinge o seu fim de curso de avanço. Logo de seguida, a garra é fechada e o atuador movimenta-a novamente para a posição inicial de recuo, sendo mantida fechada até ser cortado um novo perfil.

A garra só pode abrir para largar o perfil na rampa 3 se não se encontrar nenhum perfil a ser rebarbado no 2^{o} dispositivo de rebarbagem.

Se, ao fechar a garra, o detetor de fim de curso $S102$ não for ativado, significa que o perfil não caiu na rampa. Neste caso, a garra deve abrir novamente para que o perfil caia e seguidamente fechar. Se, ao fechar, o detetor não for novamente ativado deve ser emitido um aviso de falha para uma intervenção por parte do operador.

Em relação à sobra, a garra abre para a sobra passar e fecha de seguida, quando esta cair no respetivo depósito.

5.1.1.11 Rebarbagem

À semelhança da máquina de corte, também esta operação apresenta dois movimentos:

- rotação da ferramenta de rebarbagem ($A11$);
- translação horizontal da máquina de rebarbagem ($A12$).

Estes movimentos estão representados na Figura 5.15.

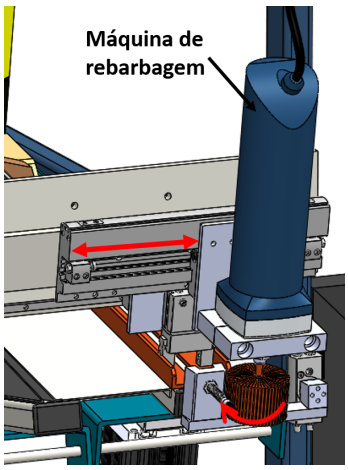


Figura 5.15 - Movimentos da operação de rebarbagem.

A máquina de rebarbagem deve ser ativada antes do movimento de translação. Assim sendo, o botão *on/off* da máquina de rebarbagem deve ser mantido na posição *on* para que a máquina seja controlada remotamente a partir de um contacto.

O funcionamento do eixo linear pneumático ($A12$) é semelhante aos movimentos descritos anteriormente. O comando pneumático é executado por uma válvula monoestável 5/2 ($V12$) que, em caso de falha de comando, assegura que o atuador regressa à posição mais recuada, afastando a máquina de rebarbagem do perfil.

Para que as passagens da ferramenta de rebarbagem sejam efetuadas a uma velocidade moderada, são colocados dois estranguladores unidirecionais.

São colocados dois detetores de fim de curso ($S121$ e $S122$), para ser possível verificar se o atuador executa a rebarbagem até ao fim e em que posição se encontra normalmente.

Em simultâneo com a rebarbagem são colocados uns bicos pneumáticos para eliminar as limalhas provenientes desta operação.

À semelhança do que acontece no corte, também neste movimento foi introduzido um transdutor de pressão que permite avaliar a qualidade da rebarbagem, através da pressão que se faz sentir nas câmaras.

A Figura 5.16 representa o esquema pneumático do atuador que movimenta a máquina de rebarbagem.

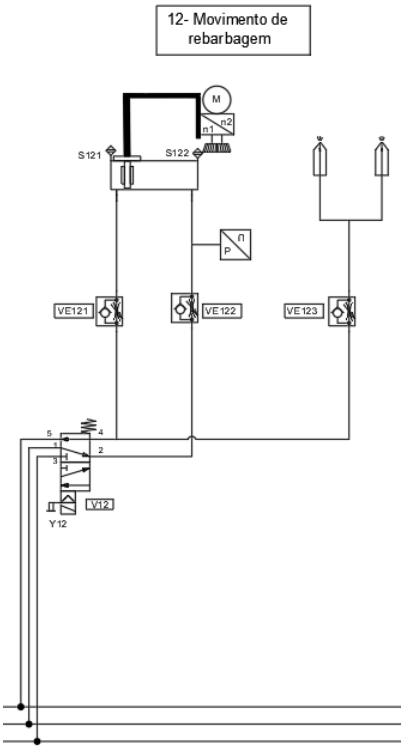


Figura 5.16 - Esquema pneumático do atuador que transporta a máquina de rebarbagem.

A operação de rebarbagem executa sempre a mesma sequência: a máquina de rebarbagem encontra-se sempre na posição recuada, isto é, mais afastada do perfil e, quando existe uma nova ordem de rebarbagem, é colocada em funcionamento e o atuador é avançado.

No entanto, esta operação só deve ser iniciada se a garra pneumática estiver a segurar o perfil (nenhum dos seus detetores ativado) e o batente de fim de calha estiver rodado 90 ^{o}. Caso esta última condição não se verifique, a máquina de rebarbagem choca contra o batente.

Quando o atuador atingir o detetor fim de curso $S122$, a válvula $V12$ é desatuada e todo o conjunto é movimentado para a posição inicial.

Para que seja garantida a qualidade de rebarbagem, deve ser executado um segundo movimento de rebarbagem. Deste modo, quando o sensor $S121$ for ativado a válvula é novamente atuada, repetindo-se o movimento.

No final da quarta passagem a máquina de rebarbagem é desligada, pois esta encontra-se em funcionamento durante todo o processo.

Durante a rebarbagem, são acionados os respetivos bicos pneumáticos que criam um sopro de ar que remove as limalhas da rebarbagem.

5.1.1.12 Transporte do perfil

A última etapa do processo do 1º dispositivo de rebarbagem é o transporte do perfil, que se encontra fixo pela garra, para a rampa 3 que irá conduzir o perfil até ao 2º dispositivo de rebarbagem. O movimento executado por este atuador está representado na Figura 5.17.

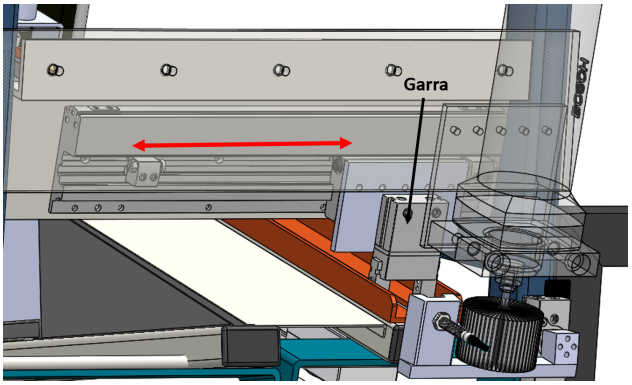


Figura 5.17 - Movimento de transporte do perfil.

Este movimento ($A13$) é executado por um atuador semelhante ao que transporta a máquina de rebarbagem e, por isso, apresentam um comando muito parecido.

A válvula que atua o atuador pneumático é uma válvula direcional ($V13$) biestável com atuação elétrica que, em caso de falha de energia, mantém o atuador na posição em que se encontra, para que deste modo a função que estava a executar seja terminada.

Para ser reconhecida a posição em que se encontra o atuador, se está pronto para receber o perfil para a rebarbagem ou se está a transportar o perfil para a rampa 3, são introduzidos dois detetores de fim de curso ($S131$ e $S132$).

Como o movimento de transporte tem de ser executado com cuidado, são colocados dois estranguladores unidirecionais para ajustar a velocidade dos movimentos, que podem ser diferentes.

No caso de falha de comando, o atuador é mantido na posição anteriormente atingida. Se estiver a meio do curso irá movimentar-se consoante a posição da garra. Se esta não estiver a fixar um perfil volta à posição inicial. Se conter perfil continua o movimento até à rampa 3.

A Figura 5.18 ilustra o esquema pneumático do atuador que transporta o perfil e, por isso, tem acoplado a garra pneumática.

A sequência de funcionamento normal deste atuador é iniciada com o atuador na posição para a garra receber o perfil e que é detetada pelo fim de curso $S131$.

Após a operação de rebarbagem, isto é, após ativação do sensor correspondente à posição recuada da máquina de rebarbagem, garantindo que a garra continua a fixar o perfil, o atuador movimenta-se para a posição oposta parando o movimento após a ser detetado o fim de curso $S132$.

Quando este último detetor é ativado a garra abre, e passado o tempo necessário para que o perfil caia, volta a fechar e o atuador transporta a garra de novo para a posição inicial, ficando à espera de um novo perfil. Se o perfil não cair devidamente para a rampa 3, a garra volta a abrir como explicado na secção do movimento da garra.

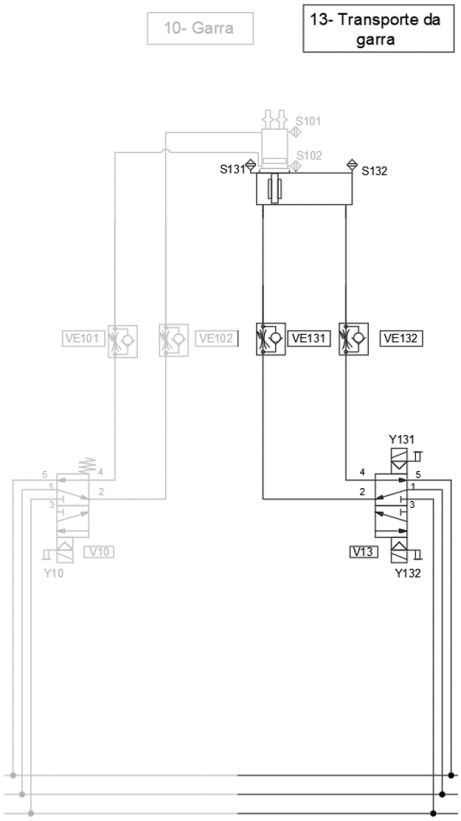


Figura 5.18 - Esquema pneumático do atuador que transporta o perfil.

5.1.1.13 Sopro de ar depois do 1º dispositivo de rebarbagem

São colocados bicos pneumáticos no início da rampa 3, para garantir que o perfil não fica preso e inicia o movimento em direção ao 2º dispositivo de rebarbagem.

Estes, por sua vez, devem ser comandados por uma válvula monoestável 5/2 ($V14$), que deve ser atuada sempre que existe um transporte do perfil para a rampa 3.

O seu esquema pneumático é apresentado no Anexo B.

5.1.1.14 2ª rebarbagem

Os elementos do 2º dispositivo de rebarbagem caracterizam-se por executarem os mesmos procedimentos associados à 1ª rebarbagem, pelo que a solução de comando dos movimentos implementada também será a mesma, isto é, o comando dos atuadores pneumáticos e equipamentos elétricos é igual.

A Figura 5.19 ilustra os movimentos existentes no 2º dispositivo de rebarbagem.

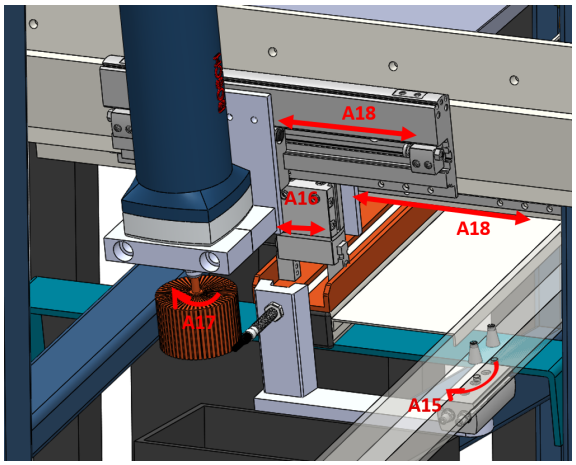


Figura 5.19 - Movimentos da 2ª rebarbagem.

Na Figura 5.20 está representado o comando pneumático da 2ª rebarbagem.

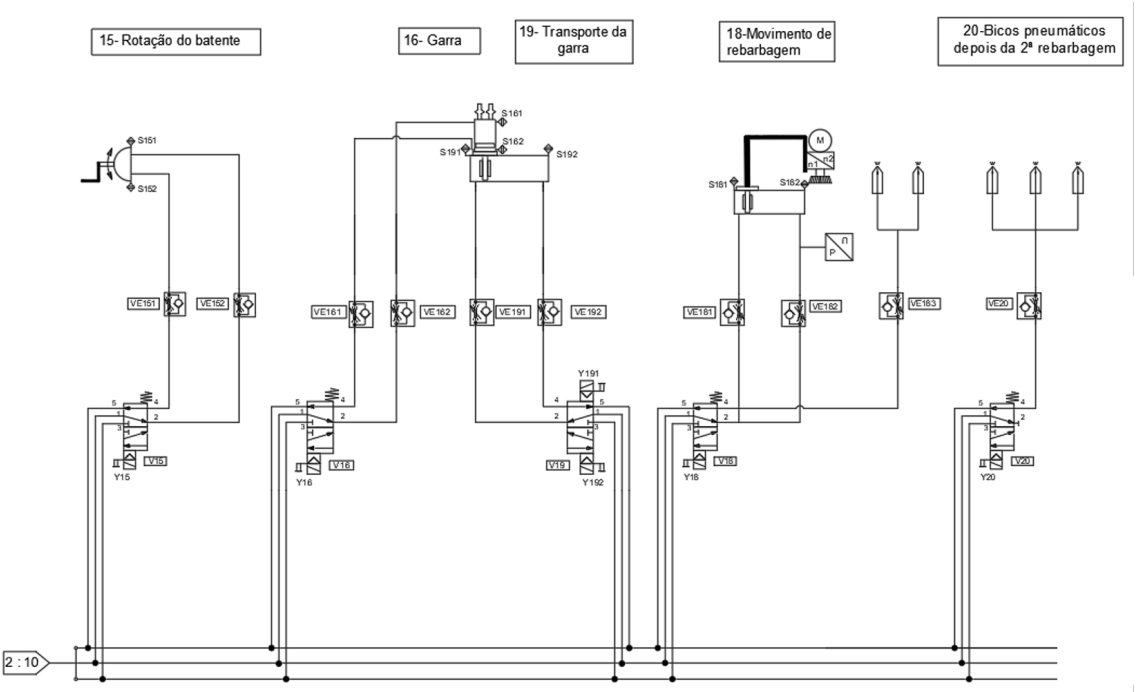


Figura 5.20 - Esquema pneumático dos movimentos do 2º dispositivo de rebarbagem.

A principal diferença é em relação ao momento em que a garra larga o perfil na rampa de descida 4. Esta etapa só pode acontecer se não se encontrar nenhum perfil a ser movido pelo atuador alimentador, nem nenhum perfil à espera para ser empurrado.

5.1.1.15 Alimentação dos perfis para a zona de inserção

Este movimento ($M21$) é responsável por empurrar os vários perfis rebarbados para a zona de inserção de perfis nas cassetes. Assim sendo, é empurrado um perfil de cada vez para a zona de inserção da primeira cassete ou para a segunda cassete, utilizando um atuador pneumático de 3 posições que permite a alimentação das duas cassetes.

A Figura 5.21 ilustra o atuador para empurrar o perfil.

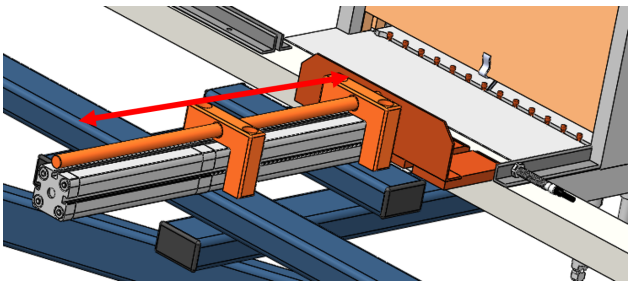


Figura 5.21 - Movimentos do atuador alimentador.

Na Figura 5.22 é representado o esquema pneumático relativamente ao atuador alimentador de perfis para a zona de inserção nas cassetes.

O atuador pneumático deve ser mantido normalmente na posição mais recuada, sendo que para este efeito são utilizadas duas válvulas direcionais monoestáveis 5/2 ($V211$ e $V212$), que em caso de falha de energia garantem o recuo do atuador.

Este atuador funciona como dois atuadores interliga- dos, sendo o 1º de simples efeito e o 2º de duplo efeito. É o movimento de recuo do 2º atuador que força o 1º atuador a recuar, caso este não tenha a sua câmara primária pressurizada. As posições atingidas são:

- **válvulas desatuadas** - só a câmara de recuo do 2º atuador está pressurizada, originando o recuo do atuador;
- **válvula *V211* atuada e válvula *V212* desatuada** - a câmara primária do 1º atuador e a secundária do 2º atuador estão pressurizadas. O atuador faz o primeiro avanço para a sua 2ª posição, a que correspondente alimentação do perfil para 1ª cassete;
- **válvulas *V212* atuada e válvula *V211* atuada ou não** - a câmara primária do 2º atuador é pressurizada e o atuador faz o avanço maior para a sua 3ª posição, a que corresponde a alimentação do perfil na 2ª cassete. Neste caso, é indiferente a posição da primeira haste do atuador.

Além das válvulas direcionais, é ainda importante implementar três estranguladores de caudal unidirecionais que permitem ajustar as velocidades dos movimentos.

Para ser conhecida a posição do atuador são colocados três detetores de fim de curso, consoante as diferentes conjugações temos as seguintes posições:

- ***S211* ativado e *S2122* e *S213* desativados** - o atuador encontra-se recuado;
- ***S212* ativado e *S211* e *S213* desativados** - atuador posicionado na segunda posição;
- ***S213* ativado e *S211* e *S212* desativados** - atuador posicionado na terceira posição;

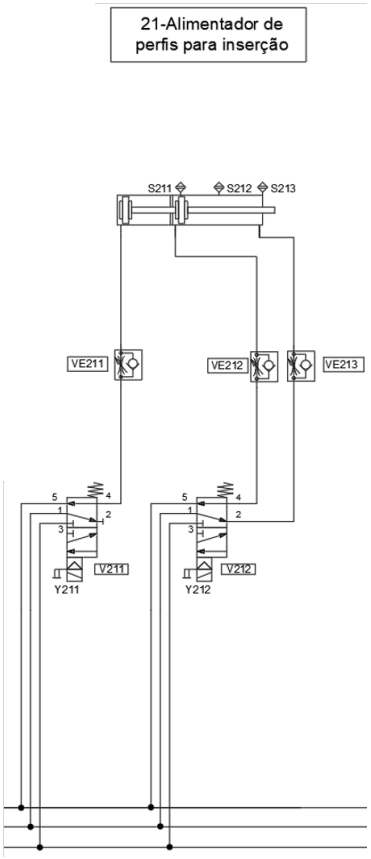


Figura 5.22 - Esquema pneumático do atuador alimentador de perfis.

O sensor indutivo (*S*5) implementado no batente fixo da rampa 4, permite averiguar quando é que o perfil termina o movimento de descida e está pronto para ser "empurrado" pelo atuador para a zona de inserção dos perfis nas cassetes.

A cassete a ser alimentada primeiro, é a cassete que corresponde ao curso do atuador mais pequeno, isto é, que corresponde a 2ª posição do atuador. Esta alimentação é realizada até que a cassete esteja completa, ou seja, que sejam inseridos 30 perfis.

Após serem inseridos os 30 perfis na 1ª cassete, a alimentação de perfis passa a ser executada para a 2ª cassete.

Deste modo, o atuador encontra-se normalmente recuado e quando o sensor *S*5 deteta que chegou um novo perfil, o atuador é avançado empurrando o perfil, até ser ativado o detetor de fim de curso. Neste momento, ambas as válvulas são desatuadas e dá-se o movimento de recuo, ficando pronto para a alimentação do próximo perfil.

No caso de falha de comando, o atuador regressa sempre à posição inicial, sendo necessário executar um movimento de avanço para verificar se não ficou nenhum perfil indevidamente a meio do curso.

5.1.1.16 Inserção de perfis nas cassetes

A inserção de perfis nas cassetes corresponde ao movimento de elevação dos perfis até que estes tenham ultrapassado as molas de retenção que existem na parte mais inferior de cada cassete.

Na Figura 5.23 estão representados os dois movimentos de inserção (*M*221 e *M*222), um para cada cassete.

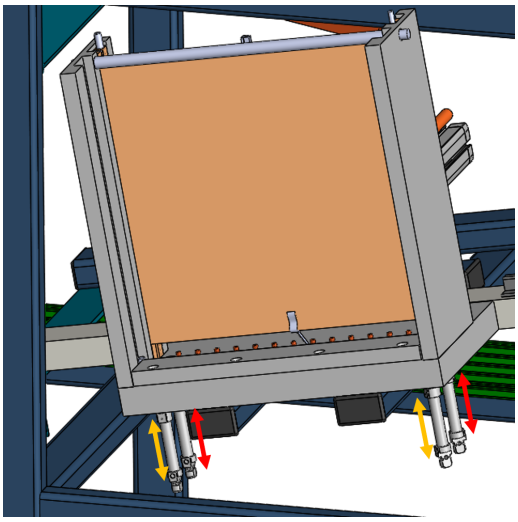


Figura 5.23 - Movimentos dos atuadores para inserção de perfis.

Cada movimento de inserção de perfis é executado por dois atuadores ($A2211$ e $A2212$, para a 1º cassete e $A2221$ e $A2222$, para a 2ª cassete) que apresentam um movimento simultâneo, sendo comandados pela mesma válvula ($V221$, para 1º cassete e $V221$, para 2º cassete). Existe, portanto, um par de atuadores com a respetiva válvula, para cada cassete.

Os atuadores utilizados são atuadores de simples efeito, garantindo que, em falha de energia, estes regressam sempre à posição mais recuda.

O comando é executado por uma válvula direcional monoestável.

Para que a inserção dos perfis seja executada de forma cuidada, com uma velocidade relativamente baixa, é colocado um estrangulador unidirecional para cada atuador, que permite ajustar a velocidade de avanço.

Nesta solução de comando, são também colocados dois detetores de fim de

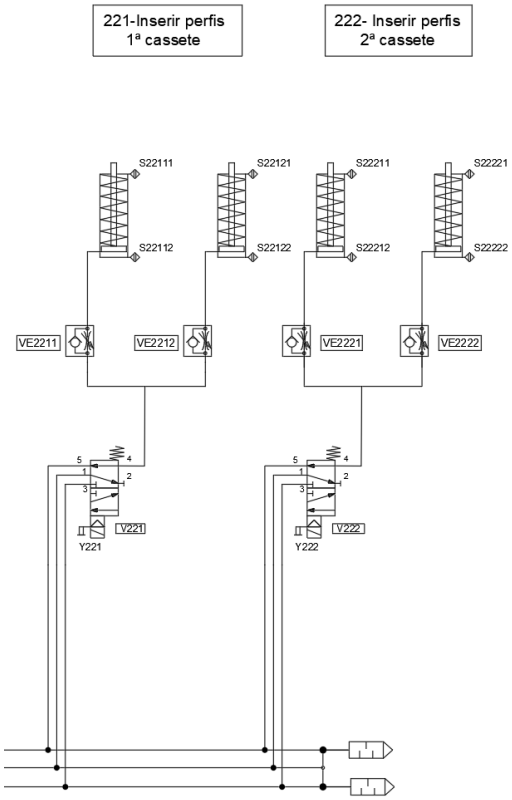


Figura 5.24 - Esquema pneumático dos atuadores responsáveis pela inserção dos perfis.

curso em cada atuador, sendo desta forma possível identificar o fim da inserção dos perfis.

O esquema pneumático dos atuadores responsáveis pela inserção de perfis nas cassetes está representado na Figura 5.24.

Com o fim da inserção de um perfil numa cassete deve ser atualizado o registo de um contador que identifica o número de perfis preparados que se encontram inseridos.

O número de perfis cortados é também um registo que deve ser atualizado, para determinar o fim da preparação de um lote de perfis, uma vez que existirão sempre 3 perfis em processo, após realizado o corte.

Os atuadores pneumáticos, como já referido, encontram-se normalmente recuados e só devem ser avançados depois do atuador alimentador atingir a posição desejada de inserção (identificada por *S*212 e *S*213) e iniciar o seu movimento de recuo.

As válvulas dos atuadores devem ser mantidas atuadas até serem ativados os respetivos fins de curso dos atuadores, garantido desta forma que o perfil é inserido. As válvulas ao serem desatuadas permitem que os atuadores de simples efeito recuem.

Quando as cassetes ficam finalizadas, o operador deve ser informado para que a cassete seja removida e substituída por uma outra. Nesta altura, a inserção de perfis continua a acontecer, mas na 2ª cassete, ou vice-versa.

Sempre que o operador colocar uma nova cassete, deve indicar não só que uma nova cassete foi inserida, mas também para que dimensão de perfil essa cassete é, de modo a que seja confirmado pelo controlador que essa cassete é a adequada para os perfis que estão a ser processados.

5.1.2 Movimentos da unidade de soldadura

À semelhança do que aconteceu na unidade de corte, também neste equipamento produtivo existe uma diversidade de movimentos que têm de ser realizados corretamente.

No entanto, este equipamento apresenta exigências associadas aos movimentos que requerem uma maior precisão, estando divididos pelas seguintes estações:

- *setup* inicial;
- manipulação de perfis:
  - alimentação do perfil (**01**)
  - inserção do perfil na forqueta (**02**);
  - elevação da forqueta (**03**);
  - transporte da forqueta (**04**);
- operação de soldadura:

  - posicionamento da carruagem de soldadura (**05**);
  - execução dos pontos de soldadura (**06**);
  - verificação de soldadura (**07**);
- posicionamento da chapa:
  - elevação do posicionador (**08**);
  - rotação da chapa (**09**).

Para não tornar esta secção demasiado extensa, apenas são descritos os movimentos relativos a uma das duas máquinas de soldadura e respetivo conjunto de alimentação, uma vez que os movimentos apresentam os mesmos comandos e funcionamento.

5.1.2.1 *Setup* inicial

Na fase inicial deste processo, é necessário executar uma série de operações para que a máquina esteja preparada, para iniciar a produção.

Em função da ordem de fabrico, o operador tem de ajustar os vários componentes a utilizar:

- ajustar o macho do atuador alimentador ao comprimento dos perfis;
- ajustar a forqueta ao comprimento dos perfis;
- movimentar o sistema de posicionamento ao longo do diâmetro da chapa para uma posição previamente calculada;
- colocar as peças de centragem em função do diâmetro da nova chapa;
- inserir as cassetes carregadas com os perfis corretos;
- colocar as chapas a soldar no devido local;
- posicionar a 1º primeira chapa, alinhando o dente com os elétrodos da máquina de soldadura.

Além destas ações, ainda devem ser dados a conhecer à máquina os seguintes dados:

- tipo de chapa (rotor/estator);
- diâmetro interno e externo;
- comprimento do perfil;
- número de dentes;
- ângulo entre dentes;
- diâmetro correspondente à posição do sistema do posicionador.

Estas últimas informações são fundamentais para o comando da máquina, pois é a partir delas que serão definidos certos movimentos, como será apresentado de seguida.

Antes do operador dar a validação final, deve ser verificado se o sistema de rotação das chapas está a executar a rotação correta, sendo nesse momento selecionado o modo de teste da máquina.

Após todas as informações necessárias, é verificado se as cancelas estão realmente fechadas e dá-se início ao processo.

5.1.2.2 Alimentação do perfil

O movimento de alimentação do perfil na unidade de soldadura é muito semelhante ao movimento de alimentação de perfis para a zona de inserção das cassetes da unidade de corte, pois também ele é executado por um atuador de três posições ($A01$).

Este movimento é responsável por empurrar os perfis que caiem por gravidade das cassetes e posteriormente levados à posição adequada a serem inseridos na forqueta que os transporta.

Para este movimento ser realizado, a ferramenta do atuador passa por um rasgo na parte inferior das cassetes e empurra o perfil. O movimento de recuo do atuador é feito até que caia um perfil de uma cassete, sendo seguidamente empurrado para a zona de alimentação.

A Figura 5.25 ilustra os dois movimentos possíveis a realizar, consoante a cassete que dispensa os perfis.

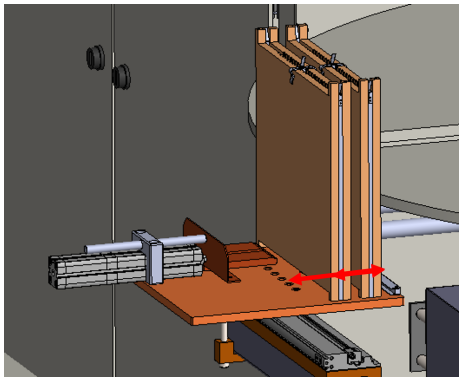


Figura 5.25 - Movimentos de alimentação de perfis.

Para uma melhor compreensão do comando pneumático deste atuador, é apresentado na Figura 5.26 o respetivo esquema pneumático.

A principal diferença no comando deste atuador relativamente ao da unidade de corte, é que a posição normal de recuo é a 2ª posição, isto é, entre as duas cassetes para que a alimentação seja feita a partir da cassete principal.

Assim sendo, é utilizada uma válvula direcional monoestável 5/2 ($V011$) que, em caso de falha de comando, garante que o 1º êmbolo se mova para a 2º segunda posição.

É também utilizada uma válvula direcional 5/2 ($V012$) que, em falha de comando, se mantém na mesma posição, pois se por acaso o atuador estivesse alimentar um perfil e a válvula fosse monoestável, na interrupção de energia o atuador ia recuar e iria cair outro perfil da cassete, criando a hipótese de virem a ser empurrados dois perfis, em vez de um.

Em função das quatro câmaras pneumáticas que podem ou não estar pressurizadas, obtêm-se as seguintes posições:

- **válvulas desatuadas** - só a câmara de recuo do 2º atuador está pressurizada, originando o recuo do atuador;
- **válvulas *V011* desatuada e *Y0121* atuado** - a câmara primária do 1º atuador e a secundária do 2º atuador estão pressurizadas, atuador é posicionado na 2º posição, que corresponde alimentação de perfis a partir da cassete principal;
- **válvulas *Y012* atuada e válvula *V011* atuada ou não** - a câmara primária do 2º atuador é pressurizada e o atuador faz o avanço maior para a sua 3ª posição, a que corresponde a alimentação do perfil. Neste caso, é indiferente a posição da primeira haste do atuador.

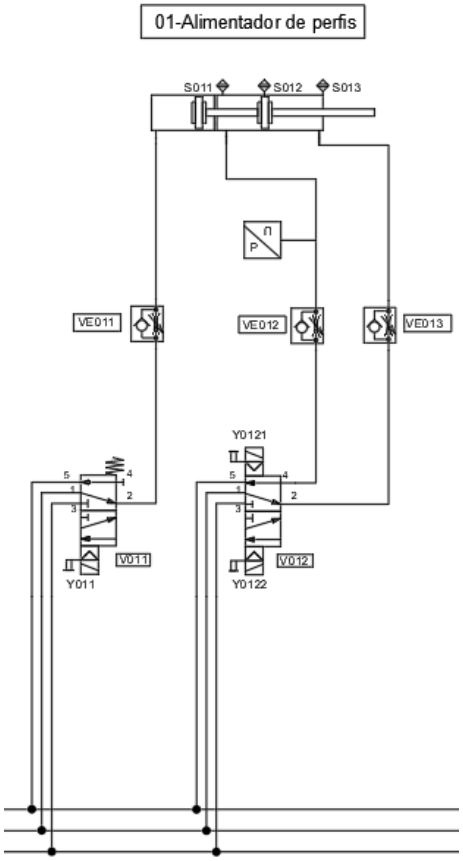


Figura 5.26 - Esquema pneumático do atuador alimentador de perfis.

Devem ainda ser instalados três estranguladores de caudal, para ajustar as velocidades dos movimentos, bem como três detetores de fim de curso ($S011$, $S012$ e $S013$) que permitem identificar cada uma das três posições de paragem do atuador:

- ***S011* ativado e *S012* e *S013* desativados** - o atuador encontra-se recuado;
- ***S012* ativado e *S011* e *S013* desativados** - atuador posicionado na 2ª posição (posição normal);
- ***S011*, *S012* e *S013* desativados e *Y0122* atuado** - atuador na posição de alimentação, com perfil;
- ***S013* ativado e *S011* e *S013* desativados** - atuador posicionado na 3ª posição, o que significa que não foi empurrado nenhum perfil.

Visto que o atuador alimentador quando está a empurrar o perfil, não ativa nenhum fim de curso quando termina o movimento de alimentação, é implementado um transdutor de pressão que deteta um aumento de pressão quando o perfil encosta ao batente.

Deve existir um contador que incrementa cada movimento do atuador implementado, para ser conhecido o número de perfis empurrados, de cada cassete, e ter conhecimento da falta de algum perfil, pois estes podem ficar presos na cassete ou alguém retirar um perfil.

Para que o atuador não seja enganado, e não esteja a empurrar perfis de cassetes que não estejam inseridas, são colocados em cada furo onde são inseridos os pinos das cassetes um sensor de contacto, que determina se existem ou não, cassetes instaladas.

Em cada nova ordem de fabrico, o processo de alimentação de perfis é inicializado com as cassetes cheias e com o atuador na 2ª posição, o que significa que já existe um perfil da cassete principal para ser empurrado.

Para empurrar um perfil, tem de se verificar se as cassetes estão bem inseridas, se a mesa de alimentação está na posição mais recuada e, ainda, se o último perfil já foi transportado pela forqueta.

Com isto, o solenoide $Y0122$ é atuado e empurra o perfil até este encostar no batente. Uma vez que o atuador não chega atingir o fim de curso, o movimento de avanço termina quando for detetado um aumento de pressão pelo transdutor de pressão. Seguidamente, dá-se o recuo do atuador até o detetor de fim de curso $S012$ ser ativado.

Com o recuo do atuador, o próximo perfil cai e fica pronto para ser empurrado. Este movimento sequencial é executado até não ser empurrado nenhum perfil, isto é, até o fim de curso $S013$ ser ativado durante o movimento de avanço. Nesse momento, o atuador recua para a posição mais recuada (válvula $V011$ atuada) e os perfis passam a ser alimentados a partir da cassete auxiliar. É ainda dada a informação ao operador para trocar a cassete vazia, caso seja necessário, ou se for verificado que um perfil ficou encravado.

Se a cassete principal não for trocada e a cassete auxiliar for levada ao fim, é também emitido um outro alerta para o operador trocar as cassetes.

Sempre que o operador tiver intenção de trocar uma cassete, o operador deve fazer "pausa" ao funcionamento da máquina, para poder entrar dentro do perímetro de segurança, não podendo existir, neste momento, movimentos a ser realizados. O atuador alimentador tem de se encontrar na devida posição para instalação de uma nova cassete.

Para trocar a cassete principal, não pode estar a ser alimentado nenhum perfil da cassete auxiliar. Deste modo, se isto acontecer a alimentação deve ser levada até ao fim e, nesse momento, o perfil apenas recua até à 2ª posição e não para a 1ª posição. Este requisito tem de ser cumprido porque, no caso de o atuador recuar até à 1ª posição, iria cair um perfil da cassete auxiliar e ao colocar a cassete principal iria cair outro perfil dessa cassete, logo iriam existir dois perfis para serem empurrados ao mesmo tempo.

Assim sendo, pode concluir-se que, para colocar uma nova cassete principal o atuador deve se encontrar na 2ª posição e, a partir daí, a alimentação passa a ser executada a partir da cassete principal.

Relativamente à substituição da cassete auxiliar, o atuador também se deve encontrar na 2ª posição, de modo a que não fique disponível nenhum perfil da cassete auxiliar pois, desse modo, seriam também empurrados dois perfis.

No caso de falha de comando, o atuador termina a operação de alimentação ou mantém-se na mesma posição. A não ser que esteja na posição mais recuada, nesse caso irá movimentar-se para a 2ª posição.

5.1.2.3 Inserção do perfil na forqueta

Este movimento permite inserir o perfil já alimentado na forqueta para, posteriormente, ser transportado para a estação de soldadura.

Para execução deste movimento é utilizado um eixo linear pneumático guiado (*A*02) que desloca a mesa de alimentação de perfis, inserindo assim, o perfil na forqueta.

A Figura 5.27 representa o movimento que a mesa de alimentação executa na direção da forqueta.

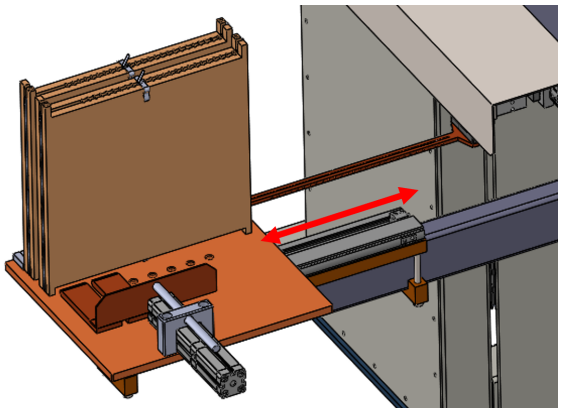


Figura 5.27 - Movimento de inserção do perfil na forqueta.

Na Figura 5.28 apresenta os vários elementos pneumáticos que auxiliam o comando do movimento de inserção de perfis.

O comando pneumático deste eixo linear pneumático é executado por uma válvula direcional 5/2, que em falha de energia movimenta o atuador para a posição mais recuada, a posição onde se encontra normalmente.

Este movimento requer uma certa atenção, uma vez que deve ser realizado com algum cuidado para que os elementos envolvidos não sejam danificados, pois no caso de o perfil se encontrar mal

posicionado ou se opuser, de algum modo, ao movimento de inserção pode danificar a forqueta. Assim sendo, é colocada uma válvula reguladora de pressão proporcional associada à câmara de avanço do atuador, que permite um ajuste específico da pressão em função do comando da válvula.

A válvula reguladora proporcional de pressão irá funcionar para dois níveis de pressão: um nível mais baixo, que será utilizado normalmente, e caso o movimento de inserção não se realize no tempo previsto, será usado um nível mais elevado para permitir dispor de uma maior força de inserção.

Em paralelo com esta válvula é colocada uma válvula direcional monoestável 5/2 ($V4$), que se encontra atuada durante o movimento, e garante que na falha de comando o eixo linear regressa à posição normal. Se não fosse implementada esta válvula, com a falha de comando a válvula reguladora proporcional de pressão não permitia que o ar passasse, sendo impossível o eixo pneumático recuar.

Como existe outro movimento que necessita de uma válvula reguladora proporcional de pressão, são colocados os dois conjuntos numa base para válvulas que se encontra dividida dos restantes elementos, apresentando assim uma alimentação independente, como se poderá verificar no Anexo B, onde são apresentados os esquemas pneumáticos globais.

Este atuador deverá possuir ainda dois detetores de fim de curso ($S021$ e $S022$), que permitem identificar se o movimento de inserção do perfil foi executado até ao fim, ou se a mesa se encontra na posição mais recuada.

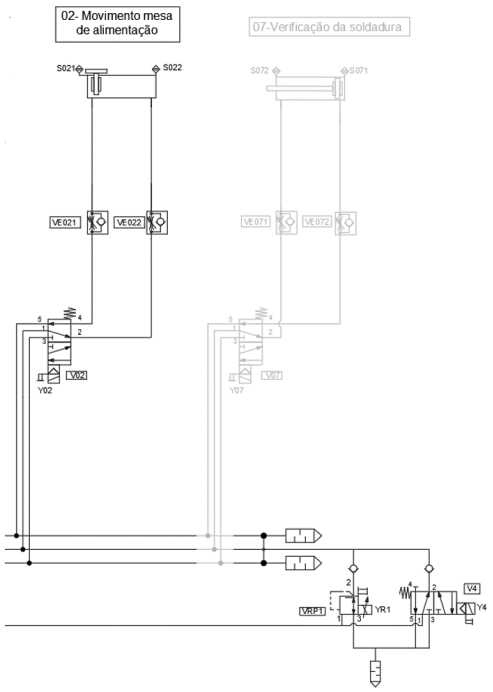


Figura 5.28 - Esquema pneumático do atuador responsável pelo movimento da mesa de alimentação.

Para que este movimento não seja executado com uma velocidade demasiado elevada são colocados dois estranguladores unidirecionais que permitem ajustar quer a velocidade de avanço, quer a de recuo.

A mesa de alimentação de perfis encontra-se normalmente na posição mais recuada, sendo nesta posição executada a alimentação do perfil. Após alimentação do perfil, com o atuador alimentador recuado e a forqueta posicionada na zona de inserção (atuador verificador recuado e o atuador que executa a elevação na posição mais avançada) é executado o movimento de avanço da mesa de alimentação.

O movimento de avanço é feito com o aumento progressivo do comando da válvula reguladora de pressão até ao nível mais baixo de pressão, que se traduz num aumento proporcional da pressão e consequentemente a força que o atuador exerce.

Se ao fim de um dado tempo o atuador $S022$ não for ativado, significa que o perfil ficou preso, logo executa-se um pequeno recuo do atuador (cerca de $1s$) e inicia-se novamente o movimento de avanço do atuador só que agora com um nível de pressão mais elevado. Se ainda assim não for ativado o fim de curso, a mesa de alimentação é recuada e deve ser emitido um aviso ao operador para intervir.

Se o detetor de fim de curso de avanço for ativado, significa que o perfil foi completamente inserido na forqueta, logo a mesa de alimentação encontra-se preparada para regressar à posição mais recuada, ficando à espera de nova ordem de avanço.

Durante o funcionamento deste movimento a válvula $V4$ tem de se encontrar sempre atuada, pois em falha de comando esta regressa para a posição de repouso e permite passar o ar

5.1.2.4 Elevação da forqueta

O movimento de elevação da forqueta é executado para que esta se movimente entre a mesa de alimentação e a posição de execução de soldadura numa posição elevada relativamente ao nível da mesa de soldadura, para assim colidir com nenhum perfil já soldado ou em alguma irregularidade existente na superfície da chapa.

A Figura 5.29 representa o atuador que executa este movimento.

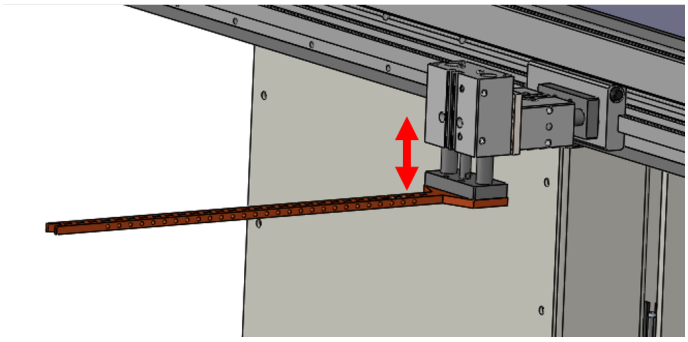


Figura 5.29 - Movimento de elevação da forqueta.

Este atuador ($A03$) é de duplo efeito e é utilizada uma válvula direcional 5/2 ($V03$) biestável para o seu comando. Esta válvula foi escolhida para que a forqueta, em falha de comando, seja mantida na mesma posição, pois caso esta estivesse a fixar o perfil durante a soldadura ao elevar-se podia arrancar o perfil soldado.

À semelhança dos movimentos anteriormente apresentados, também são utilizados dois estranguladores unidirecionais que permitem definir a velocidade do movimento, bem como dois

detetores de fim de curso ($S031$ e $S032$) para identificar as posições extremas do atuador.

A Figura 5.30 representa o esquema pneumático correspondente ao movimento de elevação da forqueta.

A forqueta encontra-se normalmente na posição mais avançada e só é elevada quando é necessário movimentar-se entre a mesa de alimentação e a estação de soldadura, ou vice-versa.

Deste modo, após a realização do último ponto de soldadura de um perfil, e enquanto a rotação da chapa é executada, a forqueta é elevada e realiza o movimento de translação na direção da mesa de alimentação.

Quando termina o movimento de transporte e a forqueta se encontra alinhada com o perfil, a válvula $V03$ é desatuada e a forqueta fica em condições de receber o perfil.

Após o recuo da mesa de alimentação, a forqueta é elevada, retirando o perfil da mesa de alimentação e movimentando-o para a posição de soldadura.

A forqueta deve ser elevada, pouco tempo depois de a mesa de alimentação iniciar o seu movimento de recuo, porque se o perfil se encontrar sobre a mesa de alimentação com o recuo desta podia sair da forqueta. Além disto, é ainda conseguido uma diminuição de tempo morto.

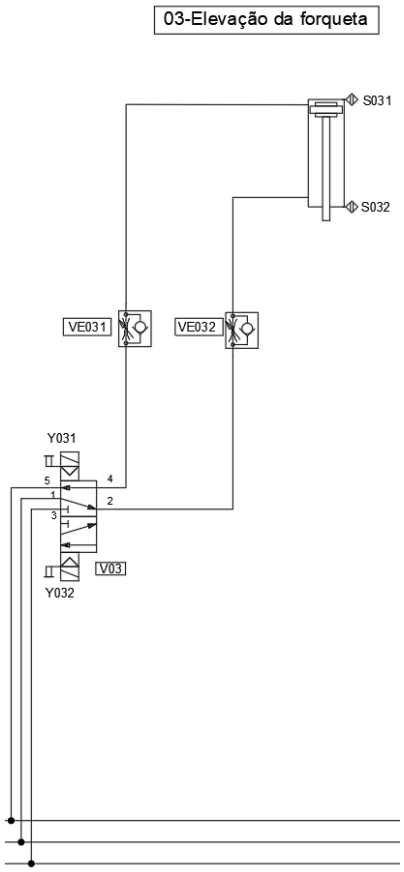


Figura 5.30 - Esquema pneumático do atuador de elevação da forqueta.

5.1.2.5 Transporte da forqueta

O manipulador de perfis é responsável pelo movimento de translação da forqueta, desde a mesa de alimentação até à posição de realização da soldadura (por baixo da pistola de soldadura). Para esse feito é utilizado um eixo linear pneumático com guiamento ($A5$) que executa um movimento guiado e preciso entre as duas posições limite.

Este atuador também transporta, além da forqueta, o atuador responsável pela elevação da forqueta e pela verificação de soldadura. A Figura 5.31 representa o movimento ($M05$) de transporte da forqueta.

O comando deste atuador é executado por uma válvula direcional 5/2 biestável ($V05$) que garante o avanço e o recuo do atuador, entre as duas posições extremas.

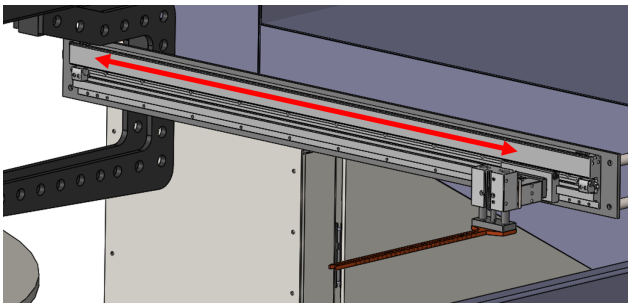


Figura 5.31 - Movimento de transporte da forqueta.

Foi escolhido este tipo de válvula, para que em falha de energia, o manipulador seja mantido na mesma posição em que estava e, por isso, não danifique nenhum elemento. Neste caso, a forqueta permanece na mesma posição e recua com o carro de soldadura, soltando-se do perfil se for caso disso, sem qualquer problema.

Além da válvula direcional foram ainda considerados dois estranguladores unidirecionais ($VE041$ e $VE042$), que permitem ajustar a velocidade de translação da forqueta.

Para verificar se a forqueta se encontra na posição de inserir perfis ou na posição de soldadura, são colocados dois detetores de fim de curso ($S51$ e $S52$).

A Figura 5.32 ilustra o esquema pneumático deste movimento.

O movimento de transporte da forqueta só é executado quando é necessário transportar um novo perfil, contudo, este movimento só pode ocorrer se a forqueta se encontrar elevada, independentemente do sentido do movimento.

Depois da soldadura de um perfil, a forqueta deverá ser deslocada para a posição de inserção do perfil, até $S042$ ser ativado.

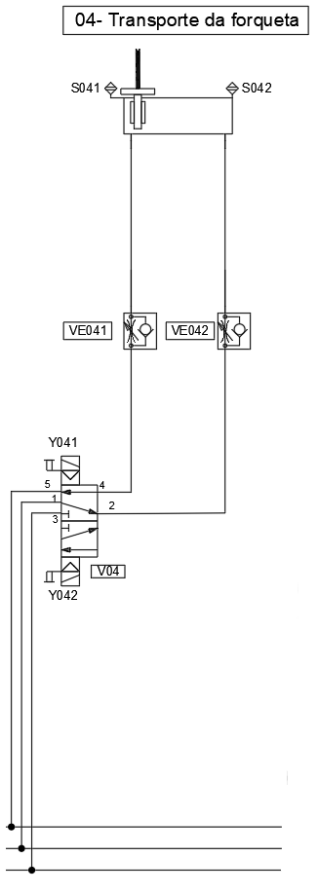


Figura 5.32 - Esquema pneumático do atuador responsável pelo transporte da forqueta.

Após a inserção do perfil e a elevação da forqueta, existem condições para transportar o perfil até a zona de soldadura, sendo esta posição detetada pelo sensor $S041$. A forqueta permanece a fixar o perfil até ao último ponto de soldadura e, após esse ponto, regressa novamente à outra posição limite para transportar outro perfil.

5.1.2.6 Posicionamento da carruagem de soldadura

O movimento da carruagem de soldadura ($M05$) é muito importante nesta unidade de produção, pois tem como função definir a posição do perfil em relação ao dente da chapa e a posição dos pontos de soldadura ao longo do perfil.

Como já referido anteriormente, este movimento é executado por um servomotor acoplado a um redutor que no seu interior tem a fêmea que, ao rodar, faz transladar o respetivo fuso que está fixo à carruagem de soldadura, como é possível verificar na Figura 5.33

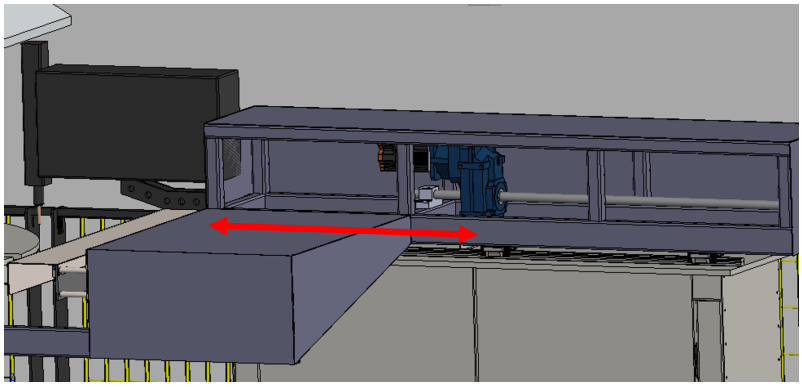


Figura 5.33 - Movimento da carruagem de soldadura.

Nesta aplicação, o mais importante é o controlo da posição da carruagem de soldadura.

Desta forma, para que exista um correto posicionamento da máquina de soldadura é necessário indicar, como já referido anteriormente, o tipo de chapa, rotor ou estator, o tamanho do perfil a soldar, o diâmetro interno no caso do rotor e externo no caso do estator.

Estes dados são importantes porque o perfil deve ser soldado a 5 *mm* da extremidade do dente e o primeiro ponto de soldadura será executado a 5 *mm* da extremidade do perfil.

No caso das chapas de estator, o primeiro ponto de soldadura é executado na posição $diametro\ interno + 5 + 5\ mm$, no caso dos rotores é $diametro\ externo - 5 - 5\ mm$ (5 *mm* para a distância da extremidade do perfil à extremidade do dente, mais 5 *mm* do primeiro ponto de soldadura até a extremidade do perfil).

Após a máquina ser iniciada, o servomotor é acionado e desloca o conjunto da carruagem de soldadura para a primeira posição.

Através do passo do fuso, de 20 *mm*, da redução do redutor e da distância a percorrer, é possível calcular qual o número de rotações que o motor tem de executar para atingir a devida posição, uma vez que por cada rotação do redutor a carruagem de soldadura desloca-se o valor do passo.

Para controlar o servomotor, é necessário selecionar um *driver* adequado que irá determinar o número de rotações necessárias, tendo em conta a posição atual do servomotor e a posição desejada.

O primeiro movimento que a carruagem de soldadura executa, a cada nova ordem de fabrico, é para a posição do primeiro ponto de soldadura, sendo assegurado que a chapa já se encontra colocada sobre a mesa.

Após a carruagem de soldadura se encontrar devidamente posicionada e o perfil, inserido na forqueta, entre os elétrodos de soldadura é executado o primeiro ponto de soldadura.

De seguida, após a verificação do 1º ponto, a carruagem de soldadura desloca-se para trás para executar o próximo ponto de soldadura, se for necessário mais pontos, recua para o próximo ponto de soldadura. Deste modo, a máquina irá deslocar-se de ponto em ponto até ser executada a última soldadura.

Quando realizado o último ponto, e garantindo que a forqueta se encontra já na sua posição elevada, a carruagem de soldadura movimenta-se novamente para o 1º ponto de soldadura, enquanto a chapa é rodada para a próxima posição de soldadura e a forqueta é transportada para a inserção de um novo perfil. Depois do posicionamento do primeiro ponto executa-se a mesma sequência sucessivamente até serem soldados todos os perfis nos dentes da chapa.

Por fim, quando for executado o último ponto no último perfil que completa a chapa, a carruagem de soldadura deve-se deslocar 100 *mm* para além do diâmetro externo da chapa, de modo a aguardar a substituição da chapa com perfis por uma chapa sem perfis. Recorre-se a esta posição ligeiramente afastada para facilitar a inserção/remoção das chapas pelo operador.

Após a validação da troca de chapas pelo operador, a carruagem de soldadura desloca-se novamente para a posição do 1º ponto de soldadura e procede-se à sequência anteriormente descrita até serem soldados todos os perfis.

Sempre que o operador for trocar uma chapa tem de informar a máquina, pois as portas são destrancadas e tem de ser garantido que todos os componentes não realizam nenhum movimento.

Como é percetível, a carruagem de soldadura, durante a execução de soldadura de perfis, apenas se desloca entre o primeiro e o último ponto de soldadura, pois não existe necessidade de este se deslocar para além disso, uma vez que na execução do último ponto de soldadura a forqueta já se encontra livre do perfil.

No caso de falha de energia, a carruagem de soldadura permanece na mesma posição, uma vez que o travão mecânico do servomotor é ativado e impede qualquer movimento.

5.1.2.7 Execução do ponto de soldadura

Como já referido na solução de construção, a máquina de soldadura é uma pistola de soldadura que é monitorizada remotamente. Contudo, os comandos disponíveis dependem do fabricante, mas como são desenhadas para serem acopladas a robôs possuem inúmeras alternativas de funcionamento para garantir a automatização do processo.

O elétrodo superior da pistola de soldadura é mantido normalmente na posição mais elevada e só entra em funcionamento quando existe uma ordem de soldadura. Esta surge no momento em que a carruagem de soldadura é colocada na devida posição e existe um perfil para soldar.

Para ser conhecida a posição do elétrodo a pistola de soldadura possui detetores de fim de curso que garantem que este se encontra na posição mais elevada.

A pistola de soldadura possui o controlo da potência de soldadura, no entanto, neste processo não é de considerar, uma vez que os materiais a soldar são sempre os mesmos.

Como o tempo de funcionamento da máquina de soldadura é relativamente curto e é executado com um intervalo de tempo grande, compreende-se que não existe necessidade de integrar um sistema específico de arrefecimento.

Para o movimento do elétrodo superior ($M06$) é necessário ar comprido, contudo todas as válvulas que poderiam estar associadas ao comando já estão integradas na pistola de soldadura. A Figura 5.34 ilustra o movimento do elétrodo superior.

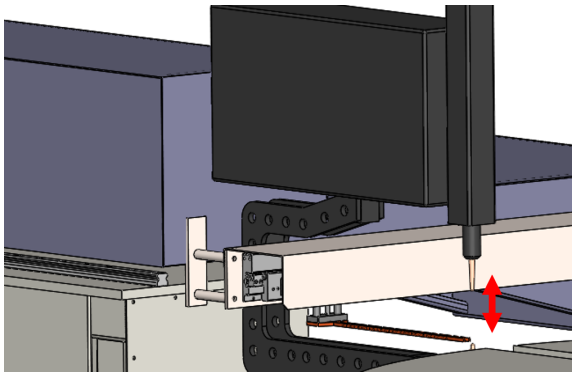


Figura 5.34 - Movimento do elétrodo superior.

5.1.2.8 Verificação de soldadura

O movimento de verificação de soldadura é executado imediatamente após a realização do 1º ponto de soldadura e consiste na atuação do atuador ($A07$), que faz com que a forqueta exerça uma ligeira força radial sobre o topo do perfil.

O movimento de verificação de soldadura encontra-se representado na Figura 5.35.

À semelhança do movimento de inserção do perfil na forqueta, também deve ser executado de forma controlada, porque se o movimento de avanço for executado com demasiada força, ou velocidade, pode destruir o ponto de soldadura bem executado.

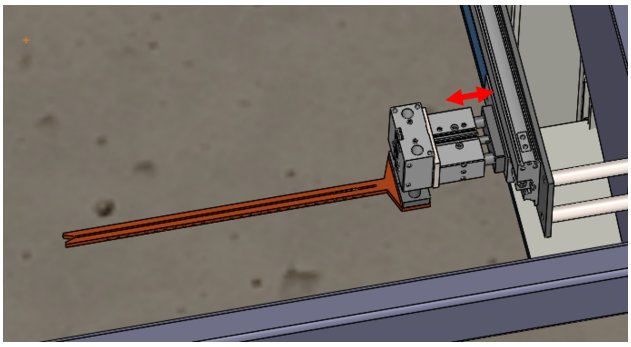


Figura 5.35 - Movimento de verificação de soldadura.

Com a utilização de uma válvula reguladora de pressão proporcional, é executado um aumento progressivo da força exercida no perfil, evitando choques entre a forqueta e o perfil.

Também neste caso é necessário atuar a válvula ($V04$), para garantir que em caso de falha de comando, a forqueta não fique a pressionar o perfil e recue.

O comando deste movimento é executado por uma válvula direcional monoestável 5/2 ($V07$) que é responsável por avançar e recuar o atuador. Esta válvula é responsável por manter o atuador verificador normalmente recuado.

São colocados dois estranguladores unidirecionais que permitem ajustar a velocidade do atuador e ainda detetores de fim de curso ($S071$ e $S072$).

O esquema pneumático referente a este movimento encontra-se na Figura 5.36.

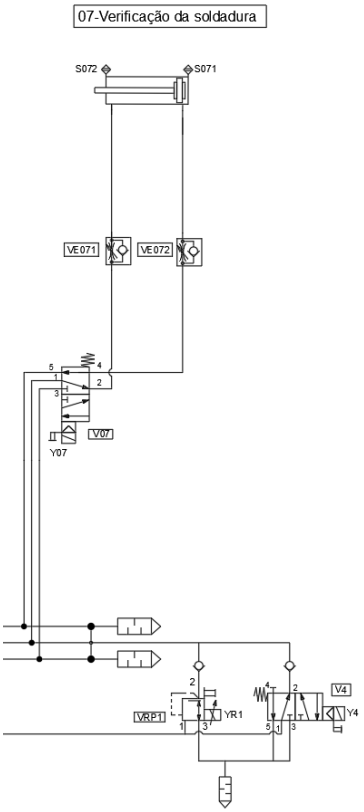


Figura 5.36 - Esquema pneumático do atuador verificador de soldadura.

O atuador de verificação da forqueta encontra-se sempre recuado, sendo apenas avançado quando é necessário verificar a soldadura, após a realização do 1º ponto de soldadura. Este movimento de avanço só pode ser executado caso a forqueta se encontre na posição de soldadura (entre os elétrodos de soldadura) e na posição mais baixa. Se estas condições se verificarem é atuada a válvula direcional e é aumentado progressivamente o comando da válvula reguladora proporcional, que irá exercer uma força cada vez maior sobre o perfil.

Este movimento é apenas executado durante um certo tempo. Se o fim de curso for atingido, então significa que o perfil se desprendeu da chapa, o que significa que o ponto de soldadura

foi mal executado. Se não atingir o fim de curso no intervalo de tempo previsto, e para o valor de força máximo, significa que o ponto de soldadura está bem executado e o atuador regressa à posição mais recuada.

5.1.2.9 Posicionamento da chapa

O movimento de rotação da chapa para uma nova posição de soldadura conta com vários tipos de movimentos: manual, pneumático e elétrico.

O movimento manual é executado durante o *setup* inicial e permite ajustar a posição do sistema de posicionamento em função do diâmetro da chapa.

Relativamente ao movimento pneumático, este é responsável por elevar o pino posicionador, sendo esta a peça que entra em contacto com a chapa e a faz rodar.

Por fim, o movimento elétrico é responsável pelo movimento de rotação da chapa e é realizado por um servomotor.

A Figura 5.37 ilustra todos os movimentos do sistema de posicionamento da chapa.

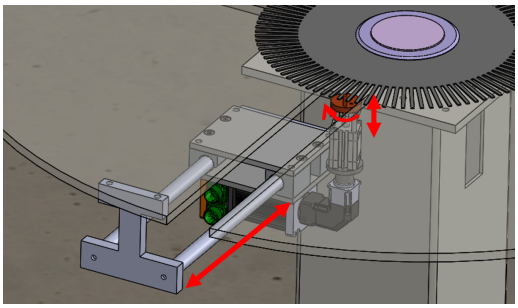


Figura 5.37 - Movimentos do sistema de posicionamento da chapa.

O movimento pneumático é executado por um atuador ($A08$), comandado por uma válvula direcional monoestável 5/2 ($V08$), garantindo que o posicionador se encontra na posição mais recuada, impedindo que este colida com a chapa.

Visto que este movimento de elevação deve ser feito muito cuidadosamente e com uma velocidade lenta, para que o posicionador seja posicionado nas ranhuras das chapas, são integrados dois estranguladores unidirecionais que ajustam a velocidade do movimento vertical.

Para detetar a posição do atuador são colocados dois detetores de fim de curso, $S081$ e $S082$.

O esquema pneumático deste movimento encontra-se representado na Figura 5.38

O movimento elétrico ($M09$) é o mais delicado e controlado destes três movimentos, pois necessita rodar um ângulo tal que deve corresponder ao ângulo entre os dentes da chapa.

Para o controlo da posição do servomotor é utilizado o *driver* recomendado pelo fabricante que após receber a posição do posicionador, comanda o servomotor até à posição desejada.

Este ângulo de rotação vai depender da posição do posicionador, da excentricidade do pino posicionador e do ângulo entre os dentes.

A posição do posicionador é medida por um sensor de cabo, incorporado no sistema de posicionamento, como referido na solução de construção.

Sendo assim, o posicionador é movido inicialmente pelo operador até um valor próximo do exigido e, depois com a medição da sua posição efetiva medida pelo sensor de cabo, é recalculado um novo ângulo de rotação. Deste modo, evita-se que o operador necessite de posicionar corretamente o sistema de posicionamento no diâmetro.

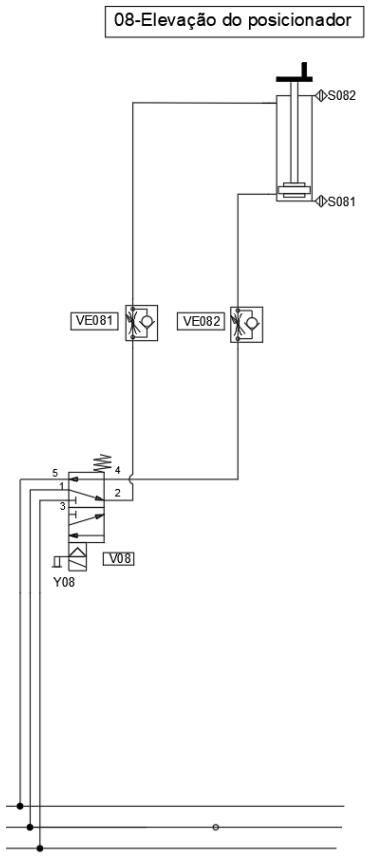


Figura 5.38 - Esquema pneumático do atuador que eleva o posicionador.

5.1.3 Esquemas pneumáticos

Nesta secção, são apresentados os esquemas pneumáticos da unidade de corte e da unidade de soldadura.

Estes esquemas têm como objetivo clarificar o comando implementado de acordo com as especificações realizadas, sendo apresentados os tipos de válvulas pneumáticas utilizadas e a unidade de tratamento e condicionamento do ar comprimido.

Devido à dimensão dos esquemas pneumáticos, estes são apresentados no Anexo B.

5.1.4 *Grafcets* comportamentais

Para uma melhor compreensão da sequência e das especificações de comando apresentadas, foram elaborados para ambas as unidades de produção *Grafcets* cujo o objetivo é clarificar de forma prática as necessidades de todos os movimentos.

Para não tornar esta secção demasiado longa e para uma melhor observação, os *Grafcets* são apresentados no Anexo C.

5.2 Análise temporal

Para ser percetível se a máquina desenvolvida, apresenta uma maior eficácia relativamente à máquina utilizada atualmente na WEG, é elaborada uma análise temporal onde constam as durações estimadas das várias etapas que constituem o processo de corte e de soldadura.

5.2.1 Unidade de corte

O processo de corte é constituído por várias etapas:

- *setup* inicial;
- ajuste do batente;
- alimentação das barras;
- corte da barra;
- 1ª rebarbagem;
- 2ª rebarbagem;
- inserção dos perfis nas cassetes.

Com a exceção da primeira etapa, todas as outras são executas em simultâneo, ou seja, ao mesmo tempo que está a ser cortada uma barra, pode estar a ser rebarbado um perfil, em ambos os dispositivos de rebarbagem, e a ser inserido um perfil nas cassetes.

Assim sendo, a duração máxima de produção de um perfil vai ser igual a etapa que apresentar uma maior duração, pois enquanto esta etapa está a decorrer as restantes etapas estão à espera que ela termine para iniciar a sua função.

Para a estimativa do tempo de ciclo deste processo, é considerado o pior dos casos: o operador necessita de colocar 10 barras no depósito, os perfis a cortar devem apresentar um comprimento igual a 300 mm e será usada a segunda cassete para inserção dos perfis.

Para uma mais fácil interpretação, é apresentado o tempo estimado de cada etapa, na Tabela 5.1.

De forma a que a mesma não fique demasiado extensa, não são enumeradas todas as vezes que os movimentos se repetem, multiplicando apenas o tempo pelo número de vezes que se repete. Por exemplo, durante a etapa referente ao ajuste do batente, este é elevado no início da etapa e depois regressa à posição mais avançada no final, por isso, é contabilizado duas vezes ($\times 2$).

Por outro lado, todos os movimentos que não são apresentados na Tabela 5.1, são realizados em simultâneo com outros movimentos e, por isso, não entram no cálculo do tempo do processo.

Após análise da Tabela 5.1, pode concluir-se que a 1ª rebarbagem é a etapa que apresenta uma maior duração.

Para ser possível comparar o tempo de ciclo da nova máquina desenvolvida com o tempo de ciclo do processo atual, é calculado o tempo de preparação de 320 perfis com 300 *mm*, o que equivale a cortar 16 barras, como foi executado na Secção 2.2.4.1. Deste modo, obtém-se:

- 7 *min* para realizar o *setup* inicial;
- 5 *min* para o segundo carregamento de barras (pois são necessárias 16 barras);
- 5 *s* para ajustar o batente ao comprimento do perfil (realizado apenas uma vez);
- 320×21 *s* para a execução da rebarbagem dos 320 perfis.

Assim sendo, o tempo de preparação de 320 perfis é cerca de $2h30min$, menos $1h$ do que o processo atual, que corresponde a uma redução de 30 % do tempo de produção.

No entanto, esta etapa pode sofrer otimizações para reduzir ainda mais o seu tempo de duração.

Em seguida, são apresentadas algumas melhorias que podem ser executadas:

- diminuir o tempo de *setup* inicial
- aumentar o declive das rampas e colocar mais bicos pneumáticos para diminuir o tempo de descida dos perfis;
- aumentar a velocidade de funcionamento dos vários elementos, principalmente do transporte do perfil e do movimento de rebarbagem.

Além destas melhorias, pode ainda ser interessante analisar as outras etapas e aumentar a sua duração, pois não existe necessidade de estes movimentos serem executados a grande velocidade, uma vez que não comprometem a eficiência da máquina se não ultrapassarem o tempo de duração da etapa de rebarbagem.

Tabela 5.1 - Duração das etapas do processo de preparação de perfis.

Etapas		**Tempo estimado**
***Setup* inicial**		
colocar barras no depósito		5 *min*
colocar cassetes vazias		1 *min*
ajustar cassetes ao comp. do perfil		0,5 *min*
ajustar machos do atuador alimentador		0,5 *min*
	Total:	**7 *min***
Ajuste do batente		
elevação batente ($\times 2$)		1 *s*
movimento do batente		3,5 *s*
	Total:	**5 *s***
Alimentação de barras		
mov. da garra ($\times 2$)		3 *s*
elevação da mesa elevatória		1 *s*
descida da barra até ao 1º calcador		2 *s*
mov. calcadores ($\times 2$)		1 *s*
descida da barra até ao batente		3 *s*
	Total:	**10 *s***
Corte da barra		
corte da barra		4 *s*
descida do perfil até a rebarbagem		7 *s*
elevação do batente		0,5 *s*
fecho da garra		0,5 *s*
	Total:	**12 *s***
1ª rebarbagem		
rotação do batente		1 *s*
mov. de rebarbagem ($\times 4$)		8 *s*
mov. de transporte de perfil ($\times 2$)		5 *s*
abertura e fecho da garra		1 *s*
descida do perfil para a 2º rebarbagem		10 *s*
	Total:	**25 *s***
2ª rebarbagem (igual a 1ª com exceção do tempo de descida)		
...		...
descida do perfil para a estação de armazenamento		7 *s*
	Total:	**22 *s***
Armazenagem de perfis		
mov. do atuador alimentador ($\times 2$)		12 *s*
inserção de perfis ($\times 2$)		5 *s*
	Total:	**17 *s***

5.2.2 Unidade de soldadura

Para calcular o novo tempo do processo soldadura de perfis em chapas de reforço após o desenvolvimento da nova máquina, é necessário observar em detalhe as principais etapas que constituem este processo.

As etapas que constituem o processo de soldadura são as seguintes:

- *setup* inicial;
- movimento da carruagem de soldadura;
- manipulação do perfil;
- soldadura do perfil;
- posicionamento da chapa.

Mais uma vez, à semelhança do que acontece na unidade de corte, são apresentados na Tabela 5.2 os tempos estimados para as diferentes etapas. Contudo, apenas são apresentados os tempos associados a uma máquina de soldadura.

Considera-se para esta avaliação que a carruagem de soldadura vai avançar e recuar 750 *mm* e vão ser realizados 4 pontos de soldadura ao longo do perfil.

Apesar de na Tabela 5.2 ser apresentado o tempo de duração da etapa de alimentação do perfil a partir das cassetes, este não deve ser considerado no cálculo final, pois é realizada em simultâneo com o movimento horizontal da forqueta. O mesmo acontece com o posicionamento da chapa, pois enquanto esta etapa decorre, é realizado o transportado de um novo perfil.

Para averiguar a eficácia deste novo processo deve ser calculado o tempo que demora a soldar 100 perfis de 300 mm, ou seja, 4 pontos de soldadura (exemplo utilizado na Secção 2.2.4.2):

- 11 *min* para realizar *setup* inicial;
- 15 *s* movimento da carruagem de soldadura;
- 100×19 *s* para transporte dos perfis;
- $100 \times 15,5$ *s* para soldadura dos perfis.

Deste modo, com apenas um posto de soldadura, obtém-se um tempo total de $1h10min$ para soldar 100 perfis numa capa.

Contudo, este tempo pode ser reduzido a metade com aplicação da segunda máquina de soldadura, obtendo-se assim um tempo de 45 *min* (contando com os ajustes necessários à 2ª máquina) para soldar 100 perfis.

Sendo assim, o processo automatizado é realizado em menos $1h05min$ do que no processo atual.

Tabela 5.2 - Duração das etapas do processo de soldadura de perfis.

Etapas		**Tempo estimado**
***Setup* inicial**		
colocar cassetes carregadas		1 *min*
colocar peças de centragem		3 *min*
ajustar machos do atuador alimentador e peça intermédia da forqueta		2 *min*
ajuste do sist. de posicionamento e verificação		5 *min*
	Total:	**11 *min***
Movimento da carruagem de soldadura		
movimento da carruagem de soldadura ($\times 2$)		15 *s*
	Total:	**15 *s***
Manipulação do perfil		
movimento de transporte ($\times 2$)		12 *s*
elevação da forqueta ($\times 4$)		2 *s*
alimentação do perfil		(4 *s*)
avanço da mesa de soldadura		5 *s*
	Total:	**19 *s***
Soldadura do perfil		
execução do ponto de soldadura ($\times 4$)		8 *s*
verificação de soldadura		3 *s*
movimento do carro entre pontos ($\times 3$)		4,5 *s*
	Total:	**15,5 *s***
Posicionamento da chapa		
elevação do posicionador ($\times 2$)		2 *s*
rotação da chapa		1,5 rad/s
	Total:	(**3 *s***)
Troca de chapa		
movimento de recuo para troca de chapa ($\times 2$)		2 *s*
troca de chapa pelo operador		3 *min*
	Total:	**3 *min***

Para soldar 10 chapas do rotor e 10 chapas do estator e demorando 3 *min* a trocar cada chapa, obtém-se um tempo de 2 turnos, conseguindo-se assim uma redução de cerca de 60% do tempo de trabalho.

No entanto, tal como acontece na unidade de corte, este tempo de produção pode ainda ser melhorado.

A etapa que ocupa mais tempo é a manipulação do perfil, que pode ser melhorada com o aumento da velocidade do movimento de transporte (principalmente o movimento em que a forqueta vai vazia) e a velocidade da mesa de alimentação.

A execução da soldadura também pode ser agilizada, assim como o movimento da carruagem de soldadura, pois uma vez que este movimento está protegido pelas barreiras de segurança não existe risco de esmagamento.

5.3 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma proposta de comando para que a máquina desenvolvida possa apresentar uma maior autonomia.

Dado o rigor envolvido na realização dos vários movimentos, foi necessário explicar em detalhe o seu funcionamento, o que antecede e sucede estes movimentos e identificar problemas que eventualmente possam surgir aquando do funcionamento da máquina.

Por fim, foi realizada uma análise temporal das duas unidades de trabalho, da qual se pode concluir que a nova máquina apresenta uma eficiência elevada comparada com o processo atual. Contudo, podem ainda ser melhoradas algumas etapas.

Deve ser evidenciado que além de este processo ser realizado num tempo muito menor com esta máquina, a exigência humana também diminui substancialmente, o que é muito positivo tendo em conta o desgaste existente no trabalho atual.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho foi proposto pela empresa WEG com a intenção de ser desenvolvido um projeto de uma máquina automatizada para a produção de chapas de reforço equipadas, que são responsáveis pelo arrefecimento do rotor e do estator de motores elétricos de indução de média e alta tensão.

O principal objetivo deste projeto é substituir um processo manual, pouco eficaz, moroso e de grande exigência humana, por uma máquina automatizada que torne o processo de produtivo mais rápido, rigoroso e com um esforço humano reduzido.

A solução a desenvolver deve ser capaz de preparar perfis de diferentes tamanhos (cortar e rebarbar), e, seguidamente, soldá-los em chapas laminadas do rotor e do estator, de tamanhos muito diversos.

A solução desenvolvida compreende dois equipamentos: a "unidade de corte", responsável por preparar os perfis, e a "unidade de soldadura", que recebe chapas do rotor e do estator, posiciona os perfis sobre as mesmas e realiza a soldadura automática.

Os equipamentos concebidos apresentam uma elevada automatização, sendo assim possível diminuir a exigência humana necessária para fabricar as chapas de reforço equipadas.

A máquina requer somente por parte do operador a supervisão do processo, a introdução de chapas e a colocação barras como tarefas mais relevantes.

Foram inseridos nos equipamentos desenvolvidos, diversas metodologias de identificação de falhas de modo a tornar o processo mais robusto.

Dada a aplicação desenvolvida na unidade de soldadura, relativamente ao transporte do perfil e ao sistema de rotação da chapa, é possível produzir chapas de reforço equipadas com um maior rigor no que diz respeito ao posicionamento do perfil.

O projeto desenvolvido permite trabalhar chapas e perfis de dimensões muito diversas, o que a torna utilizável numa diversa gama de motores.

Foi realizada uma análise temporal do funcionamento da máquina, podendo concluir-se que o projeto desenvolvido permite aumentar a cadência de produção, com diminuição da exigência humana. Conseguindo diminuir entre 30 a 60 % o tempo de produção.

Além de ser minimizado o esforço humano, deixam de ser realizadas operações como rebarbagem e soldadura por meios manuais, diminuindo assim a perigosidade para a saúde dos operadores.

6.2 Trabalhos Futuros

Tendo em conta que o presente trabalho é um projeto, a fase subsequente é a construção de toda a máquina. Porém, antes da construção efetiva existem otimizações a realizar, principalmente no que toca as dimensões dos vários elementos.

Antes da construção deverá ser feita uma lista de componentes para uma análise orçamental, em que deverão ser analisadas várias propostas consoante os tipos de equipamentos selecionados no projeto.

A análise orçamental poderá levar a uma melhoria da solução pois, em diálogo com os vários fornecedores, podem surgir novas soluções de modo a melhorar o seu funcionamento.

Como trabalhos futuros há também algumas modificações no que toca a algumas funcionalidades que iriam tornar a máquina mais automatizada:

- introduzir um sistema para deteção do perfil, junto ao batente que define o comprimento do perfil, para agilizar o processo e garantir que o perfil encosta realmente ao batente;
- criar um sistema automático para transportar as cassetes com os perfis desde a unidade de corte até à unidade de soldadura;
- tornar o movimento horizontal do sistema de posicionamento da chapa automático para que haja um maior controlo da posição e, assim, não seja necessário recalcular o ângulo de rotação;
- desenvolver um mecanismo capaz de colocar e retirar as chapas com e sem perfis da mesa de soldadura.

Será ainda interessante um estudo relacionado com os vários componentes elétricos da WEG, para incorporar nesta solução na parte de automação e usufruir das suas vantajosas funcionalidades.

Referências

[1] WEG. WEG Corporate Presentation, 2018.

[2] WEG. Experiência e determinação que se transformam em conquistas, 2019. URL https://www.weg.net/institutional/BR/pt/history.

[3] WEG. Operações WEG, 2019. URL https://static.weg.net/medias/h5a/h90/SITE-PHOTO-Portugal-Maia.jpg.

[4] Paulo Augusto Ferreira de Abreu e Manuel Romano Barbosa. Motores elétricos - Acetatos de apoio a aulas teóricas, 2018.

[5] EDP. Soluções de eficiência PME - Motores de alto rendimento, 2019. URL https://energia.edp.pt/media/107660/motoresaltorendimento_edp_pme.pdf.

[6] WEG. Eficiência energética - cód:50059891, janeiro 2016.

[7] WEG. W22 IR3 Premium 550cv, 2019. URL https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-IR3-Premium/W22-IR3-Premium-550-cv-4P-355M-L-3F-380-660-V-60-Hz-IC411---TFVE---B3D/p/11603408.

[8] WEG. Motores de indução trifásicos refrigerado por manto d'água, 2019. URL https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/WGM20/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos-Refrigerado-por-Manto-d%E2%80%99%C3%A1gua/p/MKT_WEN_WGM.

[9] WEG. Motores de indução trifásicos - Linha master, 2019. URL https://www.weg.net/catalog/weg/PT/pt_PT/Motores-El%C3%A9tricos/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o---M%C3%A9dia-Alta-Tens%C3%A3o/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sico/Motores-NEMA/Linha-Master/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos---Linha-Master/p/MKT_WEN_MLINE.

[10] WEG. W50Xn, 2019. URL https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tens%C3%A3o/Atmosferas-Explosivas/W50Xn-%28%C3%81rea-Classificada%29/W50Xn/p/MKT_WMO_BR_3PHASE_HV_TEFC_W50XN.

[11] International Electrotechnical Commission. Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) (IEC 60034-30-1), 2014.

[12] SKF GROUP. Profile rail guides LLT catalogue - PUB MT/P1 12942 EN, agosto 2013.

Anexo A

Cálculos e dimensionamentos auxiliares

Ao longo deste anexo são apresentados vários cálculos que foram tidos em consideração na escolha e definição de vários mecanismos anteriormente retratados.

A.1 Cálculos auxiliares para a escolha do atuador elétrico

Esta secção dedica-se apresentação dos cálculos auxiliares que foram executados para o curso do atuador elétrico implementado na mesa elevatória da unidade de corte.

O curso deste atuador depende principalmente dos seguintes fatores:

- curso total de elevação;
- comprimento das pernas da mesa;
- posição da base do atuador relativamente à base da mesa elevatória:
  - altura da base (a);
  - distância desde a extremidade da base da mesa de alimentação (b);
- comprimento do atuador;

A posição da base do atuador relativamente à base da mesa elevatória tem principal interesse, na medida que define o ângulo, θ, entre o atuador e a base da mesa elevatória. É através do valor deste ângulo que é definida a força necessário que o atuador deverá executar para elevar a mesa.

A Figura A.1 representa um esquema relativo a mesa elevatória e os diferentes fatores enumerados anteriormente.

Deste modo, foram executadas várias tentativas em relação as diferentes medidas enumeradas até ser encontrada uma solução otimizada. Os valores obtidos estão representados na Tabela A.1.

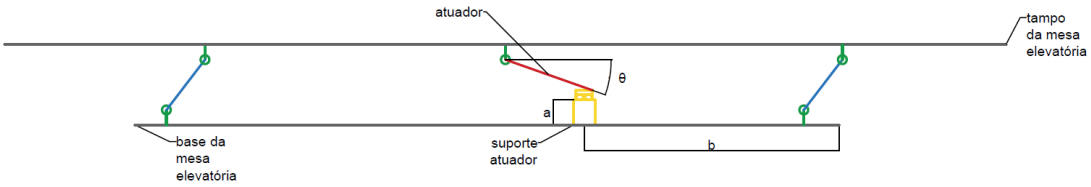


Figura A.1 - Esquema representativo da mesa elevatória.

Tabela A.1 - Dados da mesa de elevatória da unidade de corte.

Dados:	
comprimento das pernas	380 *N*
comprimento do atuador	450 *N*
curso do atuador	200 *mm*
θ_1	30 ^{o}
a	22 *mm*
b	350 *mm*

A.2 Simulação estrutural da carruagem de soldadura

Como a carruagem de soldadura apresenta um braço desfasado, foi executado uma simulação estrutural em *SolidWorks* que permite analisar o comportamento da estrutura quando sujeita ao peso dos vários elementos.

Este estudo, foi elaborado por esta estrutura aparentar ser um pouco débil e frágil. Deste modo, ao fim de várias simulações, com diferentes dimensões e orientações dos perfis, foi possível obter uma estrutura mais rígida e sem o risco de elevada deformação aquando sujeita a cargas.

Com esta simulação é possível conhecer o valor máximo de deslocamento que a estrutura sofre, que como é obvio, ocorre na extremidade do braço e ainda a tensão equivalente de *Von Mises*.

Deve ser salientado, que a simulação realizada foi executada numa estrutura aproximada à estrutura da carruagem de soldadura, pois devido alguns problemas que ocorreram e dadas as limitações do computador utilizado, foi necessário simplificar alguns elementos, nomeadamente os perfis utilizados apresentarem arestas vivas, em vez de arestas quebradas e as carruagens serem substituídas por paralelepípedo com a mesma dimensão das carruagens. Além destas alterações, ainda foi acrescentado um perfil extra que tem como função representar o braço onde se localiza o centro de massa da pistola de soldadura.

A Figura A.2 representa a estrutura da carruagem de soldadura antes da simulação.

Para a execução da simulação, foram aplicadas duas cargas externas, nomeadamente a força que simboliza o peso da pistola de soldadura (500 N) e a força que simboliza o peso do dispensador de perfis (300 N), esta força foi aplicada na zona mais crítica, que é no braço de maior amplitude. Foi ainda considerada a força de gravidade aplicada a toda a estrutura.

Para aproximar esta situação o mais possível da realidade, foram ainda designadas como "fixas" as bases das carruagens.

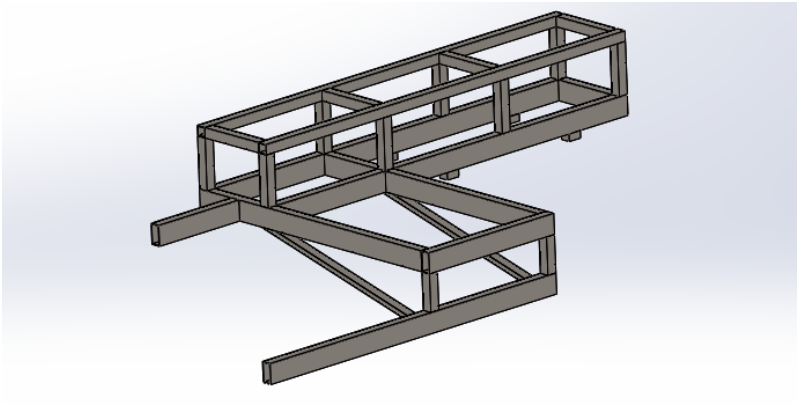
A Figura A.3 ilustra os resultados relativamente a tensão de equivalente *Von Mises*, sendo que o valor máximo observado é cerca de 44 MPa.

A Figura A.4 ilustra os resultados relativamente aos deslocamentos que a estrutura sofre. A partir destes resultados obtém-se um deslocamento máximo de 5,87 mm.

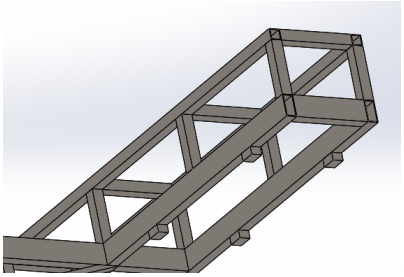
Por fim, pelo critério de *Von Mises*, representado na Equação A.1, é possível calcular o coeficiente de segurança, n, da estrutura.

O critério de Von Mises tem em consideração a tensão equivalente de *Von Mises*,$\sigma_{eq,VM}$, e a tensão de cedência do material, f_y, que neste caso, para o aço escolhido é cerca de 235 MPa.

$$n = \frac{f_y}{\sigma_{eq,VM}} = 5,29 \tag{A.1}$$

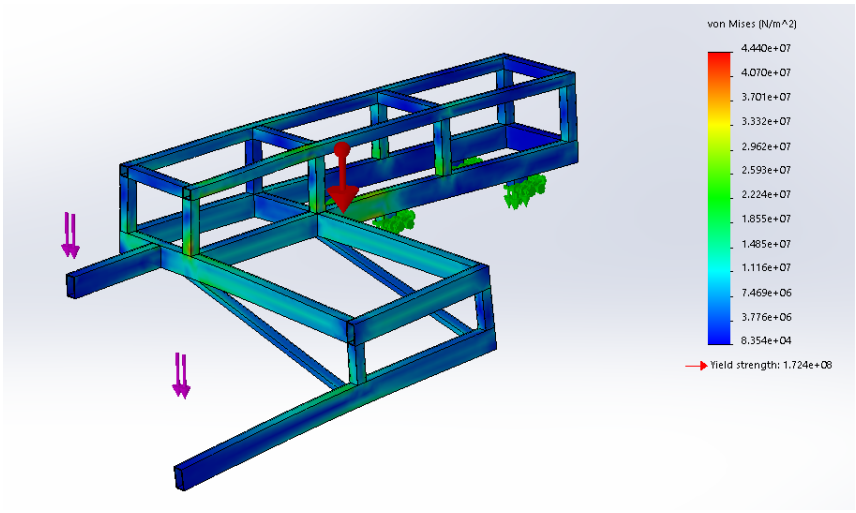


(a) Estrutura da carruagem de soldadura.

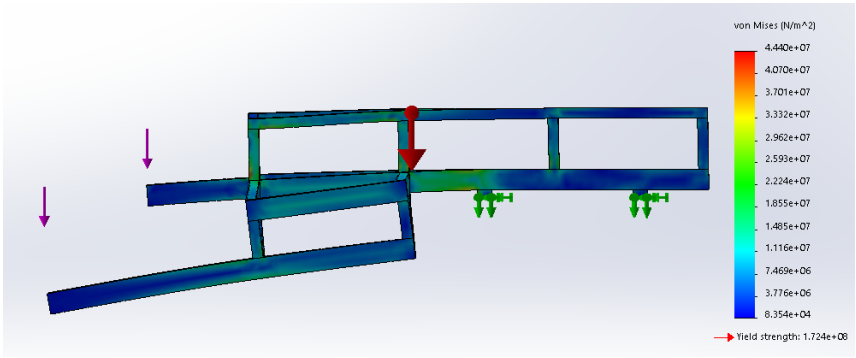


(b) Ilustração das carruagens desenvolvidas para a simulação.

Figura A.2 - Estrutura da carruagem de soldadura antes da simulação.

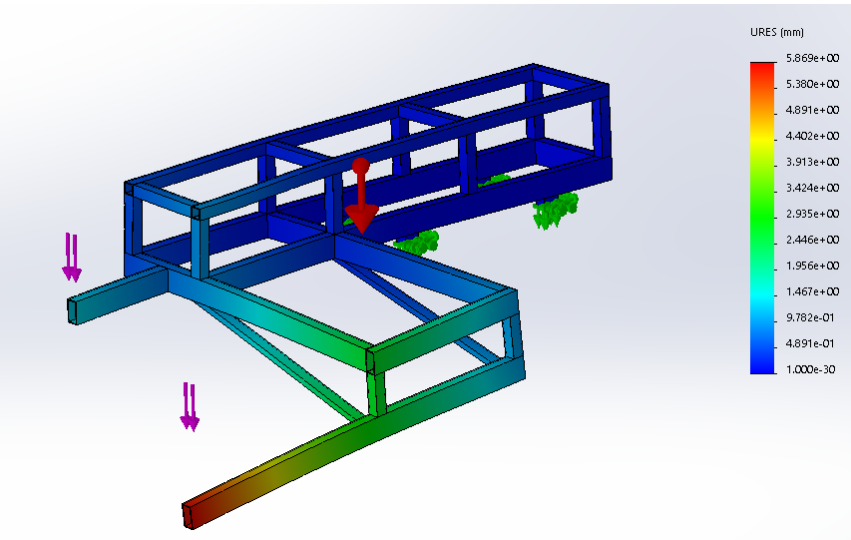


(a) Vista geral.

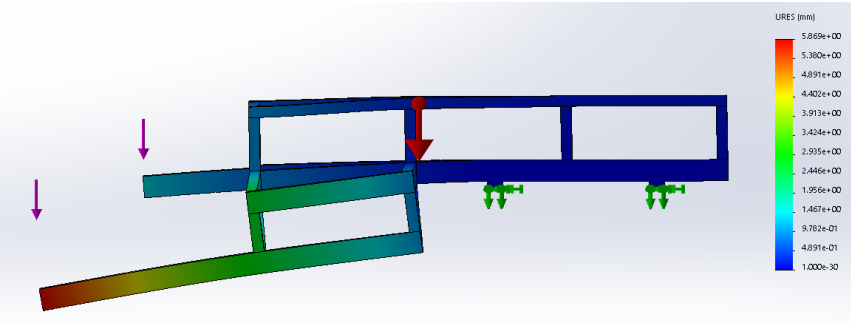


(b) Vista lateral.

Figura A.3 - Resultados da simulação relativamente à tensão de *Von Mises*.



(a) Vista geral.



(b) Vista lateral.

Figura A.4 - Resultados da simulação relativamente ao deslocamento.

A.3 Dimensionamento das guias para movimento da carruagem de soldadura

Para a escolha das guias foi tido em consideração o catálogo de guias fornecidas do fabricante *SKF*.

Estas guias e as devidas carruagens devem ser capazes de suportar a carruagem de soldadura em que estão assentes o dispensador e manipulador de perfis e a pistola de soldadura, tendo que em cada movimento garantir uma boa precisão de guiamento.

Para aplicação em causa e para o deslocamento máximo decidiu-se implementar duas guias com duas carruagens cada uma.

As carruagens implementadas nas guias estão a uma distância de 600 *mm*, logo o comprimento mínimo das guias será cerca de 1500 *mm*, uma vez que o curso máximo pretendido é 750 *mm*.

A distância entre as carruagens foi calculada tendo em conta o comprimento máximo da carruagem que fica em balanço aquando a execução dos pontos de soldadura em diâmetros mais pequenos.

Como as cargas estão aplicadas numa posição desfasada do centro da carruagem das guias, foi necessário decompor estas forças para posteriormente ser escolhido os devidos elementos.

A Figura A.5 representa um esquema da carruagem, com os respetivos apoios (as carruagens que deslizam sobre as guias) e as forças aplicadas.

A força $F0$ representa o peso da estrutura da carruagem, a força $F1$ representa o peso do conjunto da pistola de soldadura e por fim, a força $F2$ é igual ao peso do dispensador de perfis.

A força $F1$ irá provocar uma força reativa, com sinais contrários, em cada um dos conjuntos das carruagens de cada guia. A Figura A.6 representa o esquema de forças reativas na carruagem 2 e 4 em função da força $F1$, onde a força $F12$ representa a força reativa relativamente a força $F1$ na carruagem 2 e a força $F14$ representa a força reativa relativamente a força $F1$ na carruagem 4. Para as carruagens 1 e 3, as forças resultantes são obtidas da mesma forma.

A partir do esquema das forças, é possível calcular as forças que resultam da aplicação da força $F1$, pois na carruagem 2 o somatório de momentos tem de ser nulo.

$$\sum M_2 = 0 \tag{A.2}$$

$$F14 = \frac{F1\frac{a}{b}}{2} \tag{A.3}$$

$$F12 = F1 + F14 \tag{A.4}$$

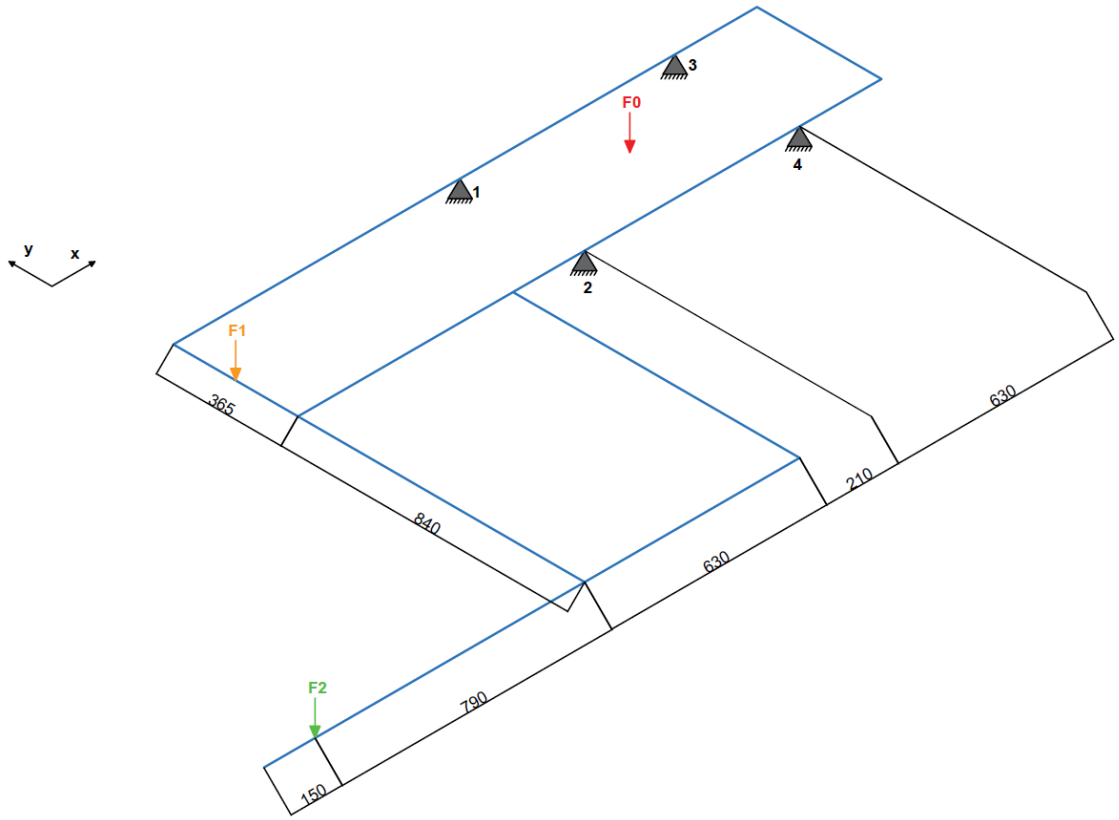


Figura A.5 - Esquema ilustrativo das forças aplicadas na estrutura da carruagem de soldadura.

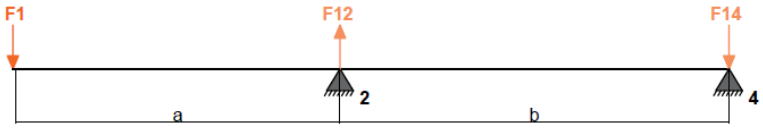


Figura A.6 - Representação das forças reativas em função de $F1$ na direção x.

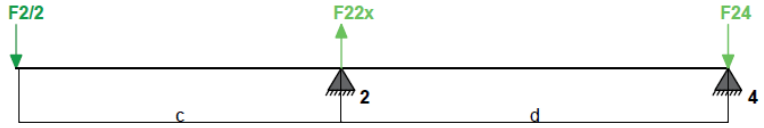
Relativamente a força $F2$, surgem reações semelhantes na direção x e ainda, na direção y.

As equações relativas à força $F2$ são:

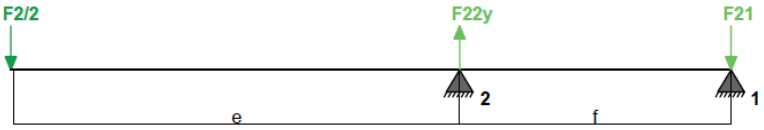
$$F24 = F2\frac{c}{d} \tag{A.5}$$

$$F22x = F2 + F24 \tag{A.6}$$

$$F21 = F2\frac{e}{f} \tag{A.7}$$



(a) Representação das forças reativas em função de $F2$ na direção x.



(b) Representação das forças reativas em função de $F2$ na direção y.

Figura A.7 - Representação das forças reativas em função de $F2$.

$$F22y = F2 + F21 \tag{A.8}$$

Executando a mesma análise relativamente as outras carruagens, pode concluir-se que a carruagem mais solicitada é a carruagem 2, pois é nesta carruagem que a soma das forças resultantes é maior, uma vez que todas as forças apresentam o mesmo sentido.

Deste modo, foram calculadas as forças resultantes relativamente as forças $F1$, $F2$ e $F0$ na carruagem 2, obtendo-se deste modo os valores expostos na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Forças aplicadas na carruagem e nas carruagens das guias.

Dados		**Forças calculadas**	
F0	1200 N		
F1	500 N		
F2	300 N		
a	840 mm	***F12y***	833 N
b	630 mm	***F22x***	1076 N
c	1630 mm	***F22y***	990 N
d	630 mm		
e	840 mm		
f	365mm		

Assim sendo, a força aplicada na carruagem 2 é igual a Equação A.9:

$$Fr_2 = \frac{F0}{4} + F12 + F22x + F22y = 3200N \tag{A.9}$$

Após obtenção da força resultante máxima estão reunidas as condições para o dimensionamento das carruagens. Para tal recorreu-se ao catálogo da SKF GROUP [12], de onde foram retiradas todas as equações e figuras que são apresentadas de seguida.

Antes de qualquer cálculo, deve ser salientado, que existe um pré-requisito a ser cumprido, a carruagem necessita de ter uma largura superior à altura do perfil, 40 *mm*.

Após uma leitura do catálogo, conclui-se que o fabricante reconhece que a força resultante máxima de cada carruagem é igual a (Equação A.10):

$$F = |Fy| + |Fz| + C_0 \left(\left| \frac{M_x}{M_x c_0} \right| + \left| \frac{M_y}{M_y c_0} \right| + \left| \frac{M_z}{M_z c_0} \right| \right) \tag{A.10}$$

As forças e momentos enunciados na Equação A.9 estão representados na Figura A.8.

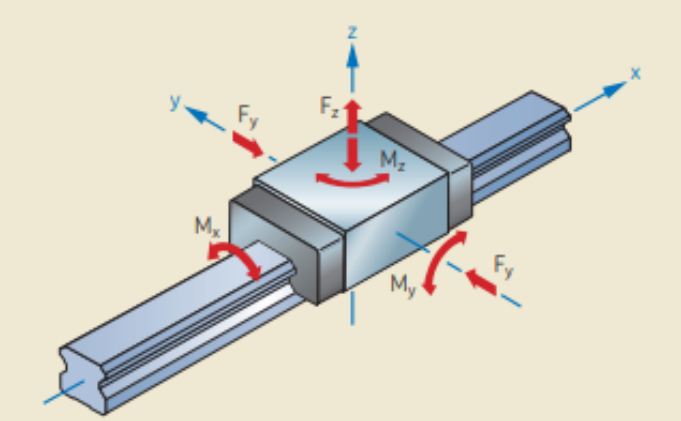


Figura A.8 - Ilustração de possíveis cargas a que as carruagens podem estar sujeitas.

Porém, neste caso em concreto, como não existem momentos aplicados nem forças na direção y, a força combinada é igual a Fz, que é igual a Fr_2 anteriormente calculada.

De seguida, é escolhida uma carruagem que garanta uma largura superior a 40 *mm*, a carruagem *LLTHC...A 25* que apresenta uma carga estática máxima de $C_0 = 30700\ N$.

Após a escolha desta carruagem, devem ser verificadas algumas condições impostas pelo fabricante que garantem que estes componentes cumprem com as necessidades da solução.

A principal exigência é em relação a um fator de segurança estática, s_0, que depende das condições de operação e que deve de ser superior a 2, como se pode confirmar na Figura A.9.

O fator s_0 depende da carga estática das guias, de um coeficiente f_d e da força combinada que foi calculada anteriormente, como está apresentado na Equação A.11:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{C_0}{f_d F} \tag{A.11}$$

O fator f_d depende das condições de carga e para este caso, foi considerado o valor de $1,5$, que corresponde ao valor máximo em situações de cargas de impacto leves ou sem cargas de impacto. A Figura A.10 representa os diferentes valores que f_d pode tomar.

Static safety factor depending on operating conditions

Operating conditions	s_0
Normal conditions	min. 2
Smooth, vibration-free operation	>2–4
Medium vibrations or impact loads	3–5
High vibrations or impact loads	>5
Overhead installations	The general technical rules and standards in the respective industrial sector must be observed. And if the application poses a risk of serious injury, the user must take appropriate design and safety measures that will prevent the carriage from becoming detached from the rail (e.g. due to loss of rolling elements or failure of screw connections).

Figura A.9 - Fator de segurança estático em função das condições de operação.

Factor f_d for load conditions

Load conditions	f_d from	up to
Smooth operation, no or light impact loads Speed ≤ 2 m/s	1,0	1,5
High impact loads Speed > 2 m/s	1,5	3,0

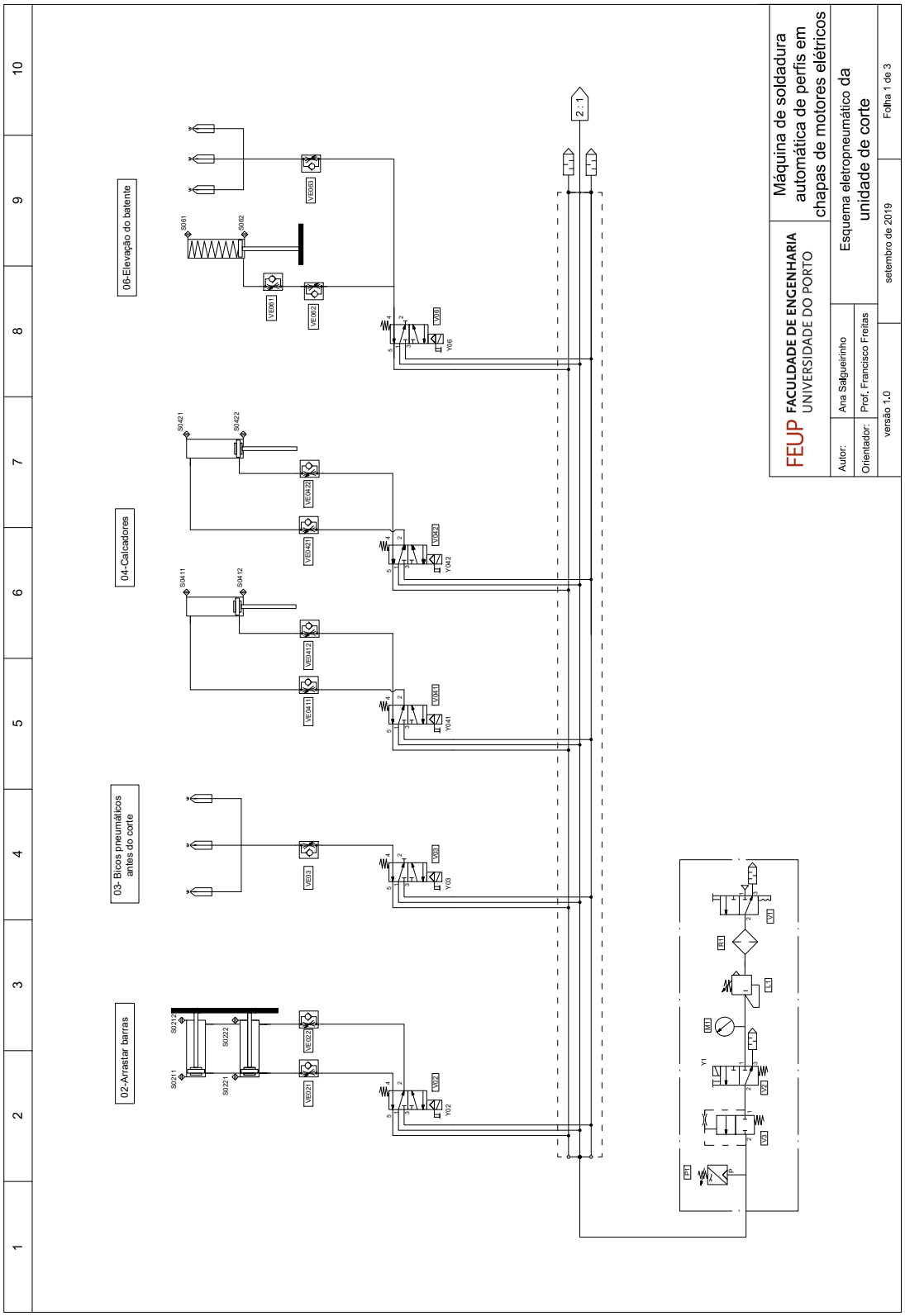
Figura A.10 - Fator para condições de carga.

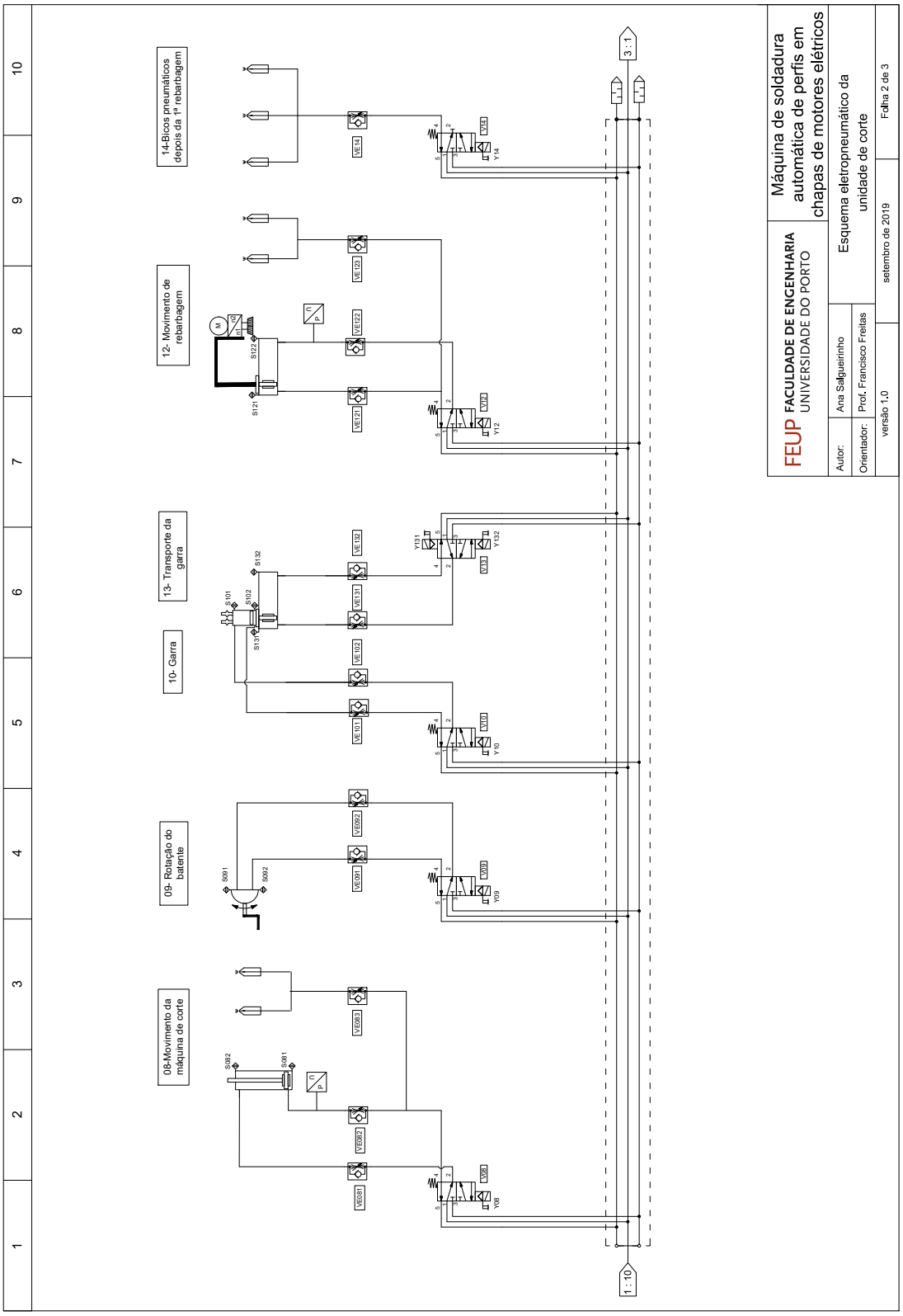
Após obtenção destes valores, foi calculado um $s_0 = 6,4$ para a carruagem escolhida, que é superior a 2.

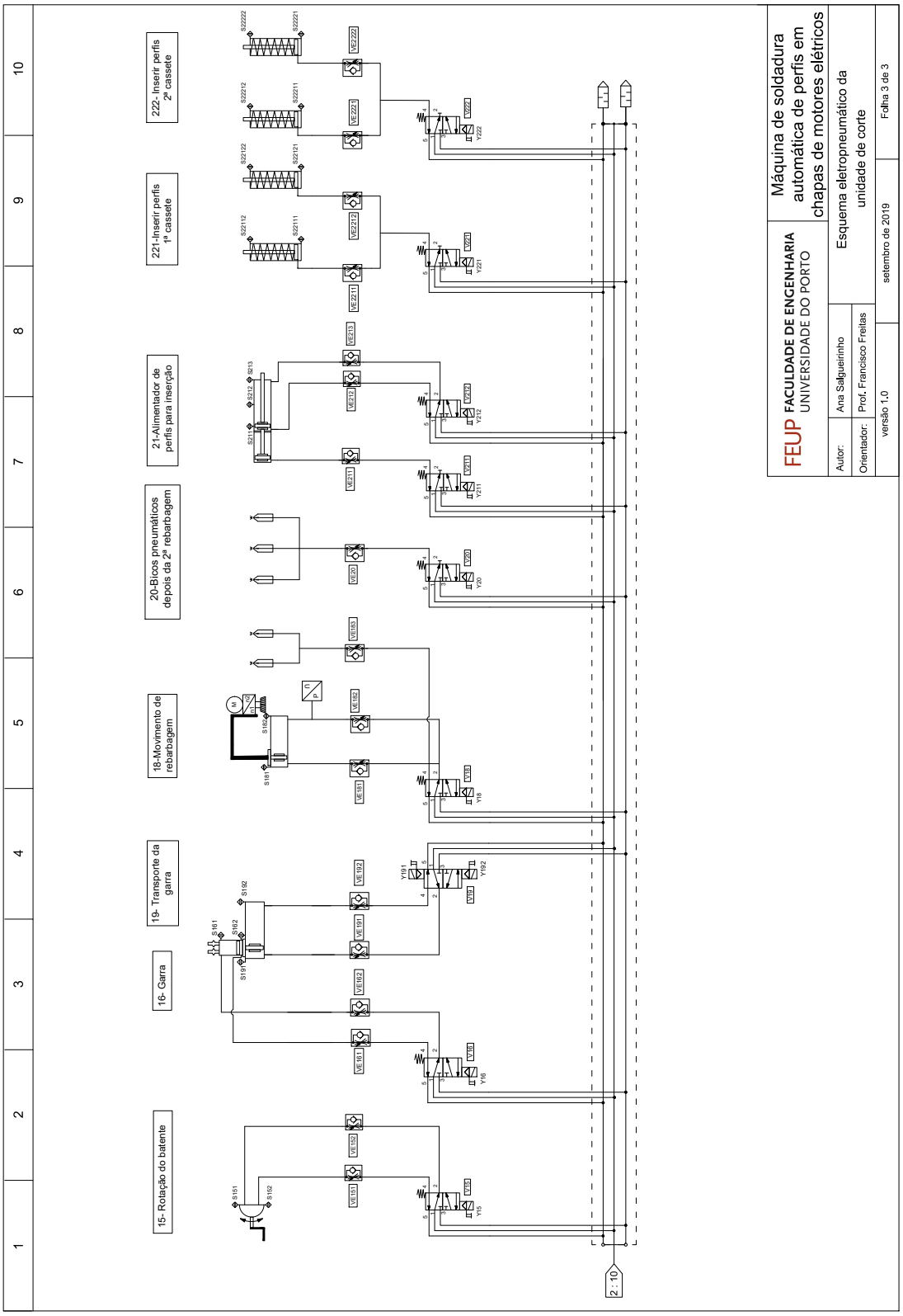
Anexo B

Esquemas pneumáticos

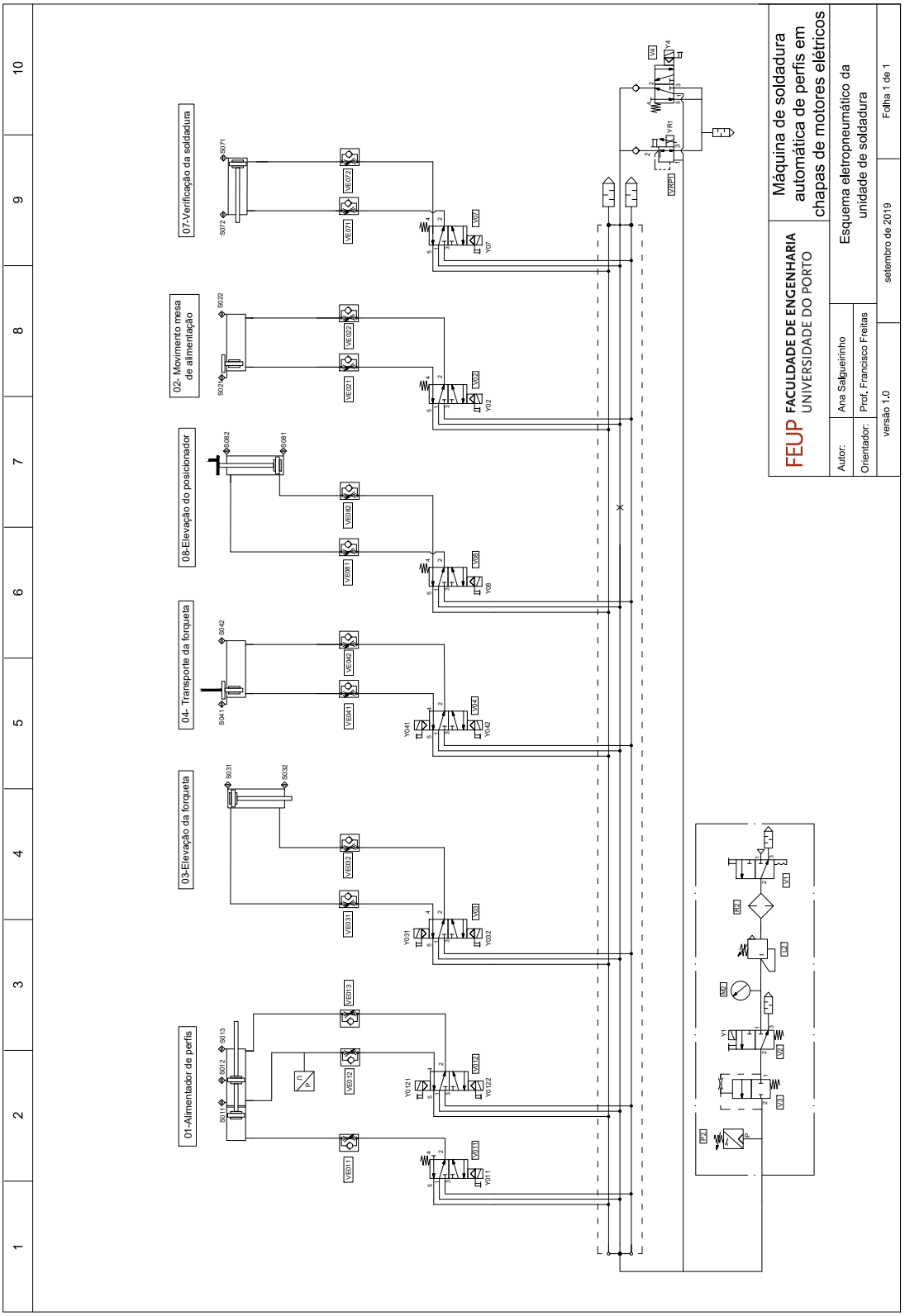
B.1 Unidade de corte


06-Elevação do batente
04-Calcadores
03- Bicos pneumáticos antes do corte
02-Arrastar barras
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO
Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de motores elétricos
Esquema eletropneumático da unidade de corte
Autor: Ana Salgueirinho
Orientador: Prof. Francisco Freitas
versão 1.0
setembro de 2019
Folha 1 de 3
2 : 1


08-Movimento da máquina de corte
09- Rotação do batente
10- Garra
13- Transporte da garra
12- Movimento de rebarbagem
14-Bicos pneumáticos depois da 1ª rebarbagem
1 : 10
3 : 1
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO
Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de motores elétricos
Autor: Ana Salgueirinho
Orientador: Prof. Francisco Freitas
Esquema eletropneumático da unidade de corte
versão 1.0
setembro de 2019
Folha 2 de 3


15- Rotação do batente
16- Garra
19- Transporte da garra
18-Movimento de rebarbagem
20-Bicos pneumáticos depois da 2ª rebarbagem
21-Alimentador de perfis para inserção
221-Inserir perfis 1ª cassete
222- Inserir perfis 2ª cassete
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO
Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de motores elétricos
Esquema eletropneumático da unidade de corte
Autor: Ana Salgueirinho
Orientador: Prof. Francisco Freitas
versão 1.0
setembro de 2019
Folha 3 de 3

B.2 Unidade de soldadura


01-Alimentador de perfis
03-Elevação da forqueta
04- Transporte da forqueta
08-Elevação do posicionador
02- Movimento mesa de alimentação
07-Verificação da soldadura
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO
Máquina de soldadura automática de perfis em chapas de motores elétricos
Esquema eletropneumático da unidade de soldadura
Autor: Ana Salgueirinho
Orientador: Prof. Francisco Freitas
versão 1.0
setembro de 2019
Folha 1 de 1

Anexo C

Grafcets comportamentais

Este anexo têm como função expor os *Grafcets* comportamentais desenvolvidos para cada unidade de trabalho.

C.1 Unidade de corte

Deve ser salientado que devido ao comportamento do 2º dispositivo de rebarbagem ser muito semelhante ao 1º dispositivo de rebarbagem, é apenas apresentado o *Grafcet* comportamental relativamente a este último que serve de exemplo ao primeiro caso.

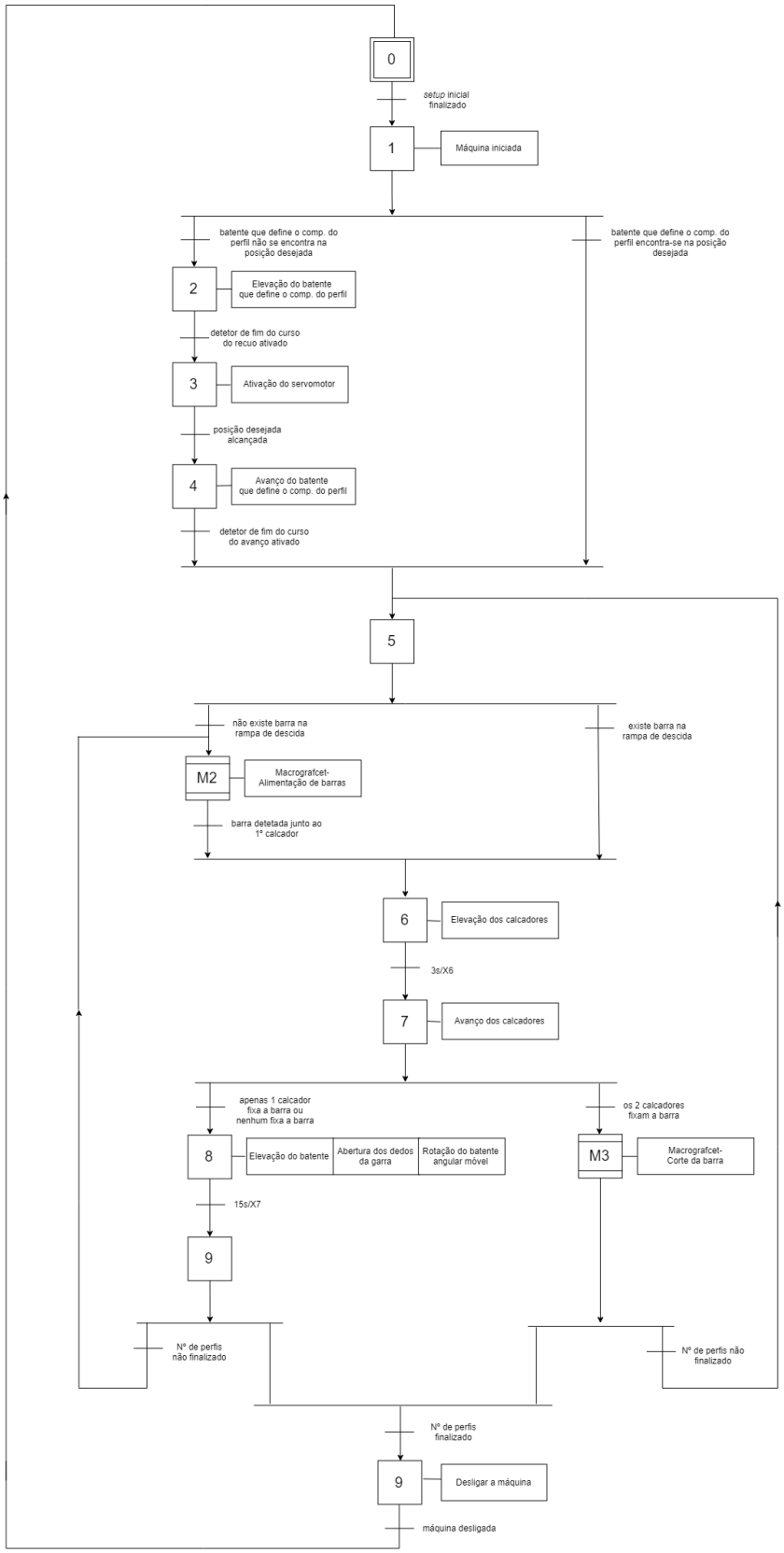


Figura C.1 - *Grafcet* G1 da fase inicial do processo de corte.

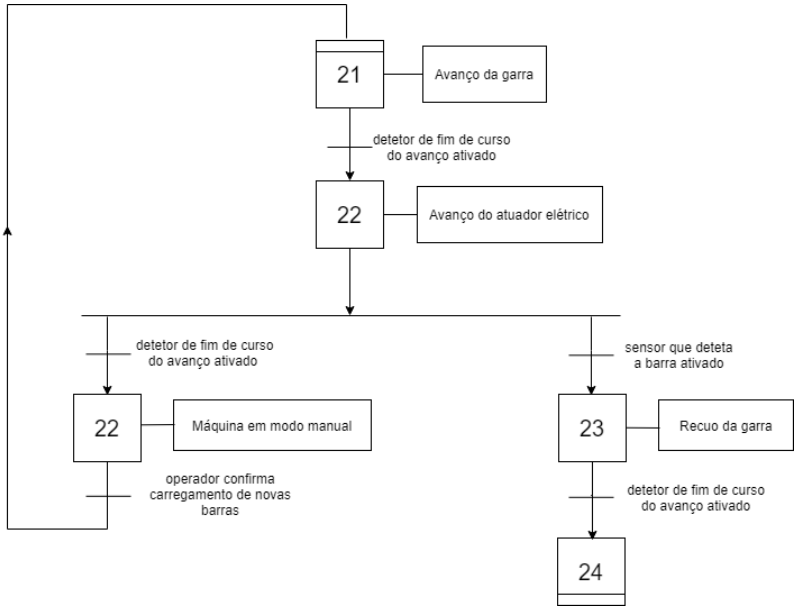


Figura C.2 - Macrografcet M2 relativo à alimentação das barras.

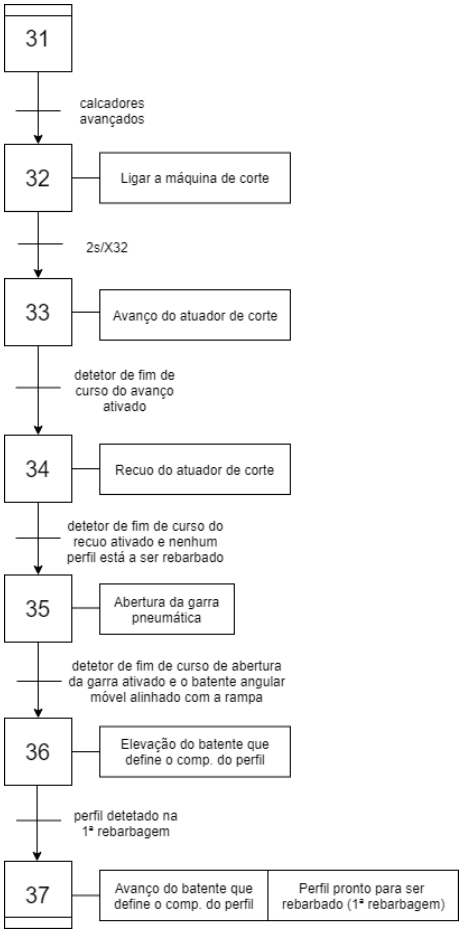


Figura C.3 - Macrografcet M3 do corte da barra.

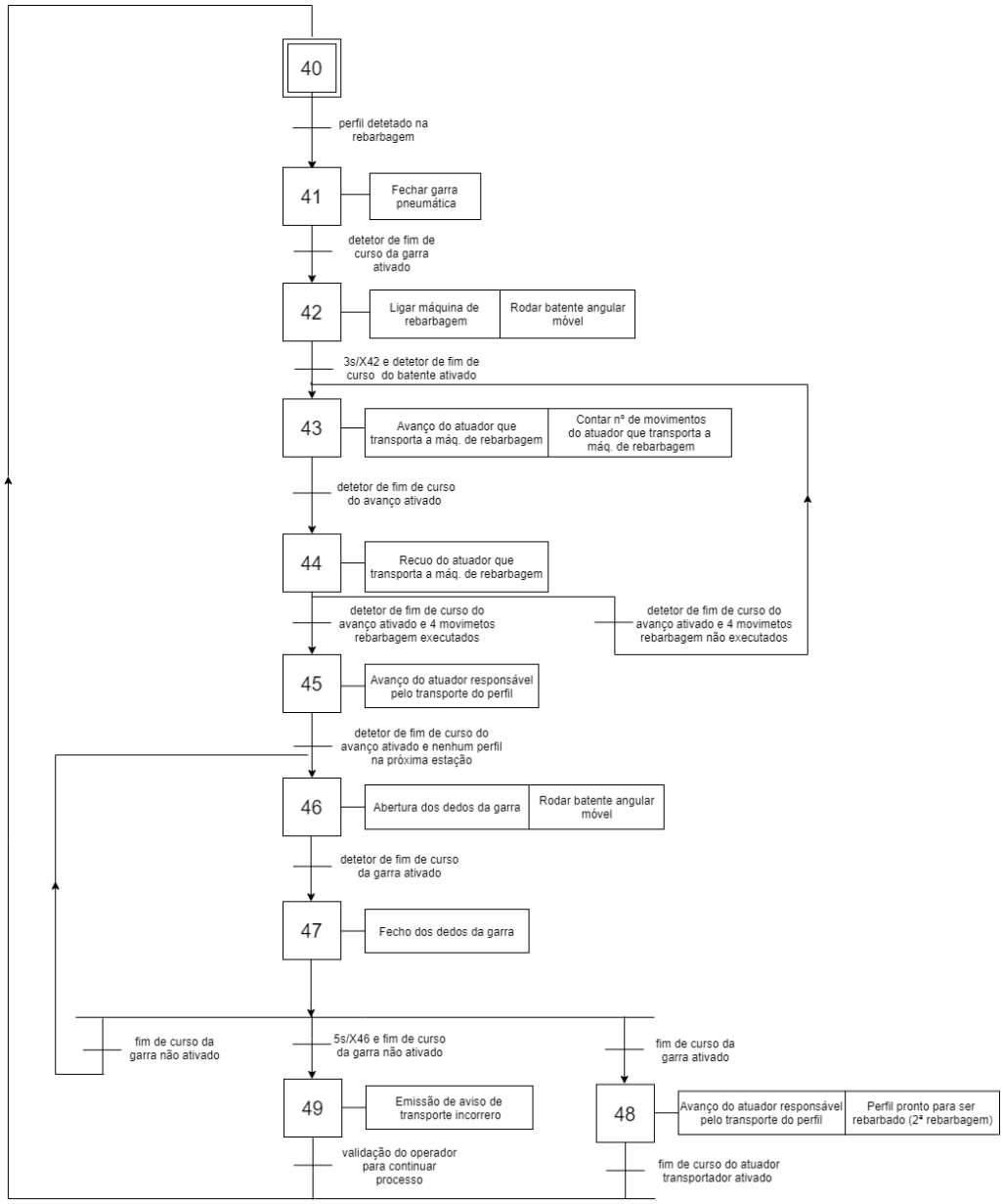


Figura C.4 - *Grafcet* G4 relativo à 1ª rebarbagem

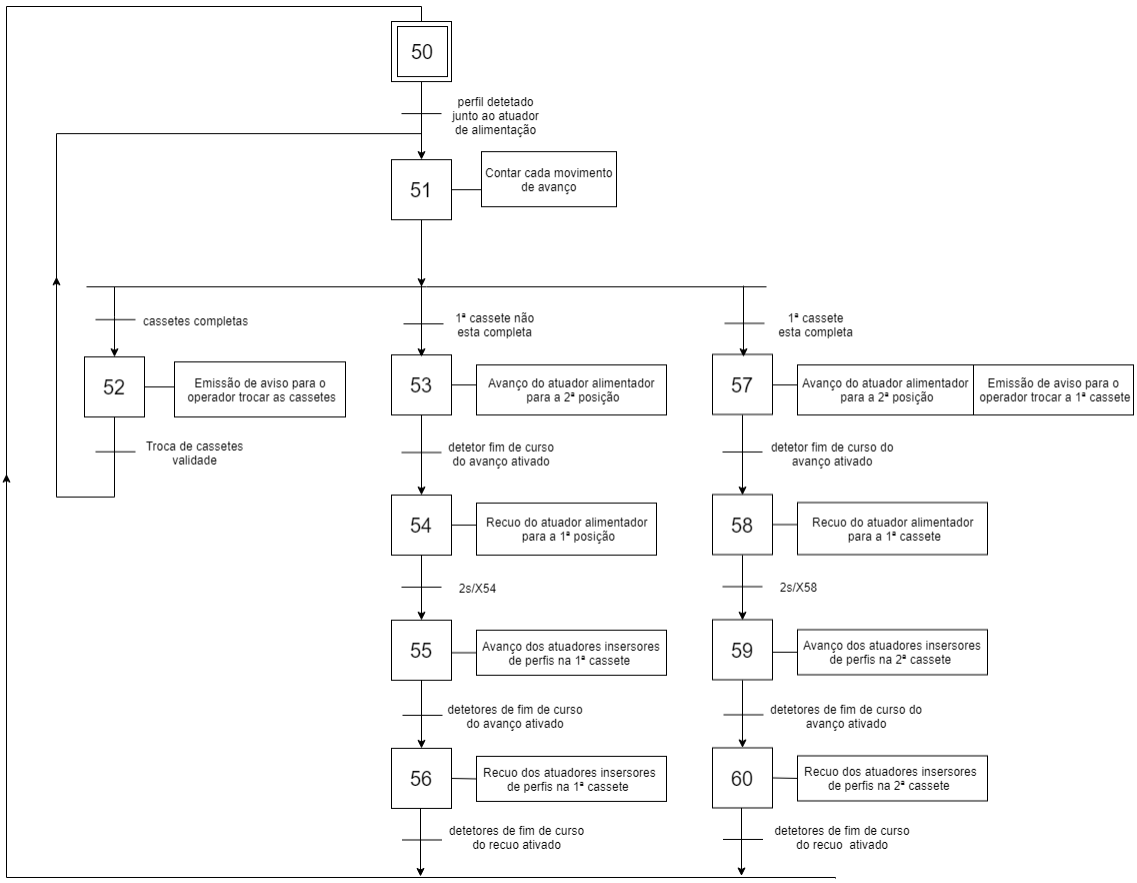


Figura C.5 - *Grafcet* G5 relativo à alimentação de perfis para as cassetes.

C.2 Unidade de soldadura

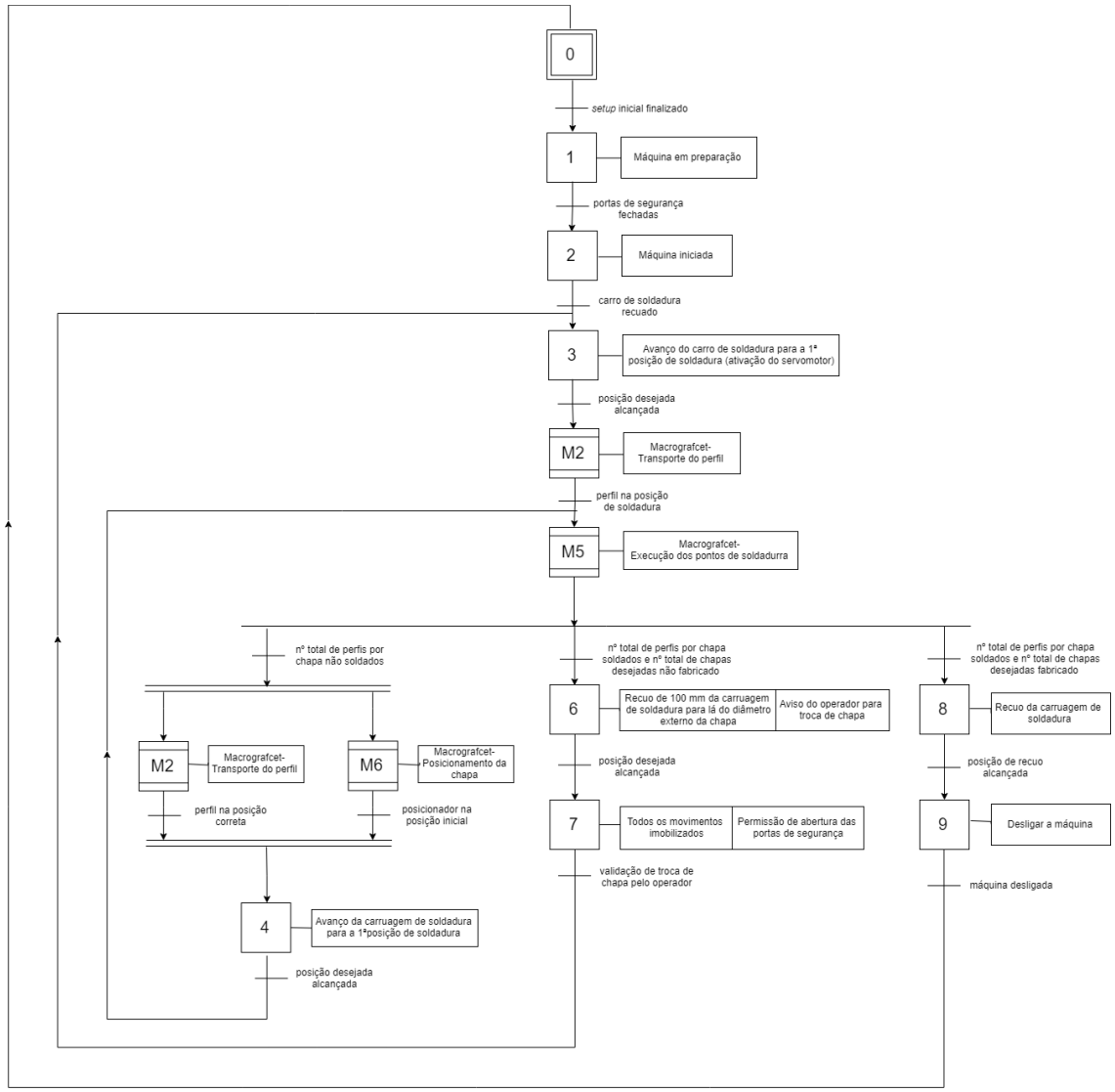


Figura C.6 - *Grafcet* G1 relativo ao funcionamento da unidade de soldadura.

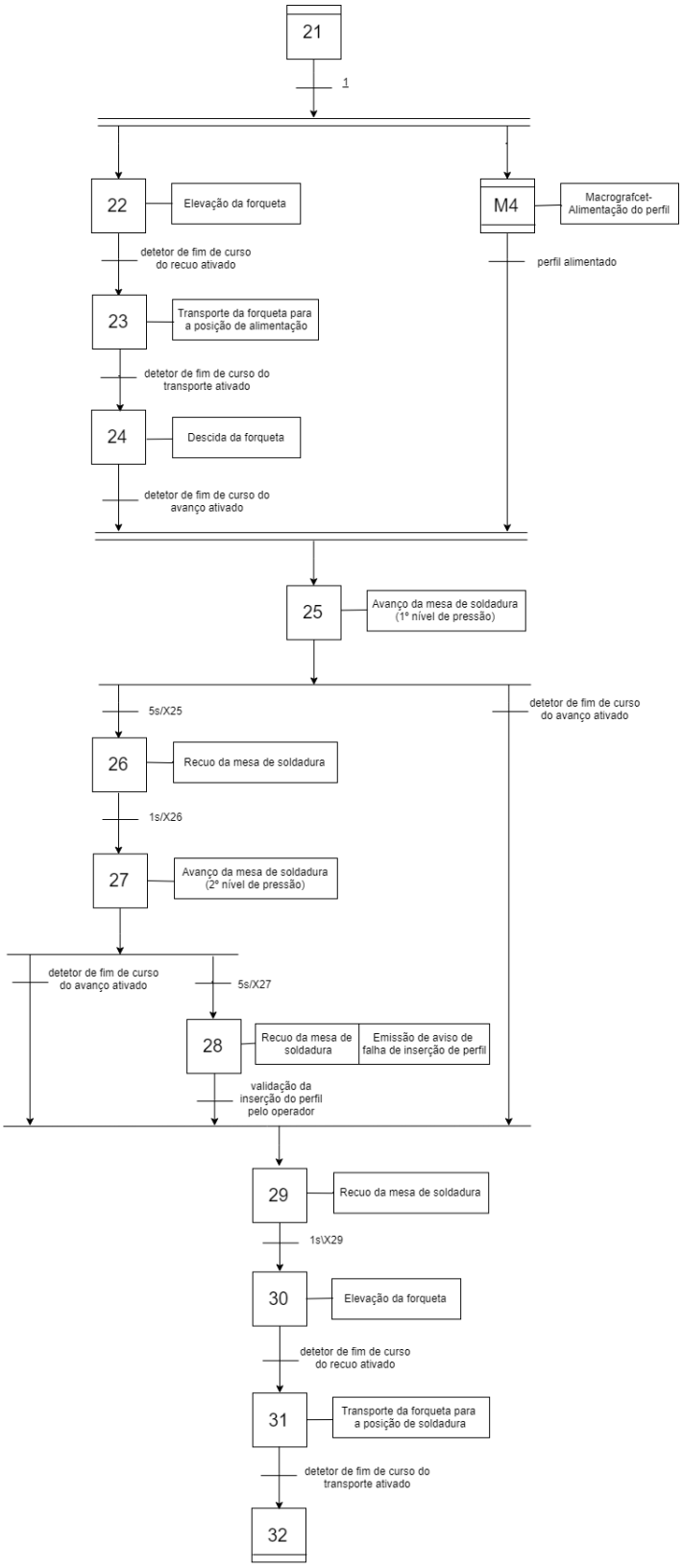


Figura C.7 - Macrografcet M2 do transporte de perfis.

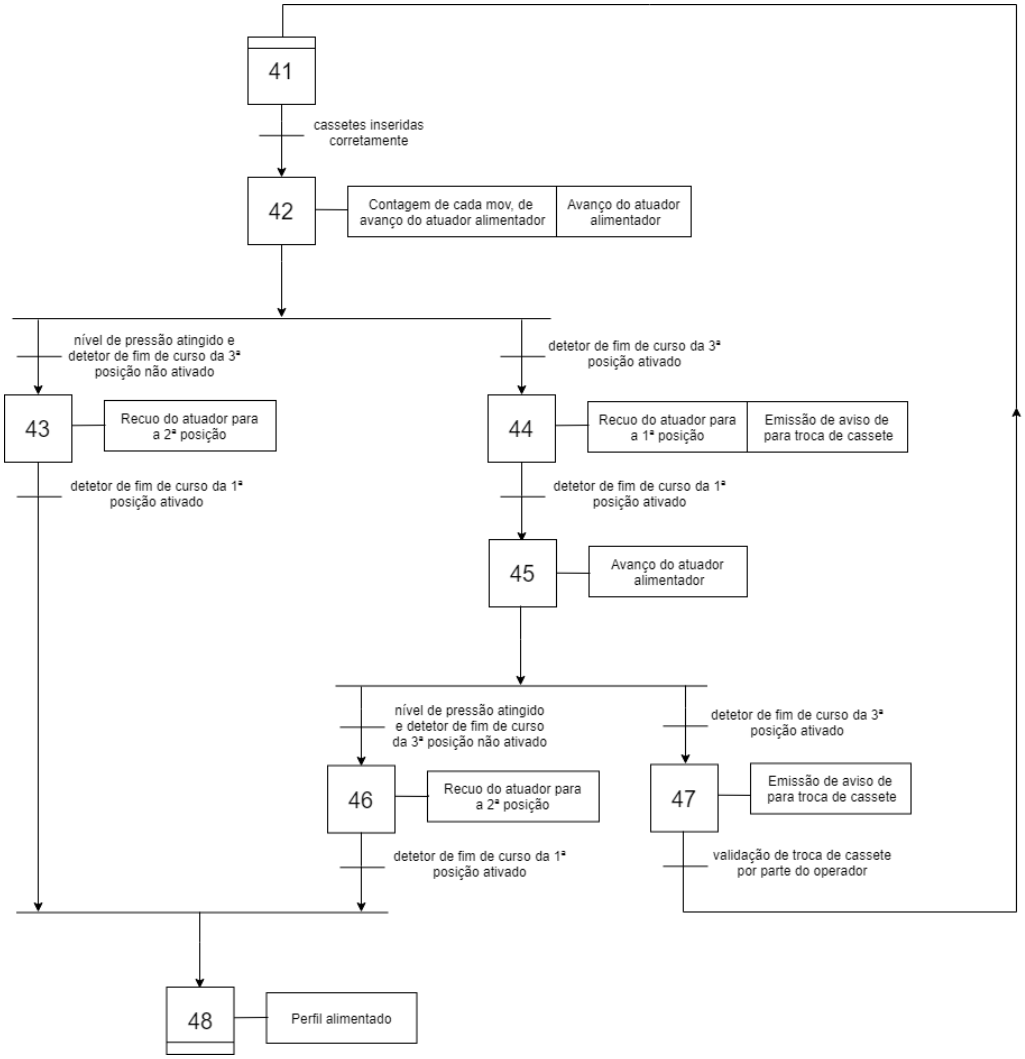


Figura C.8 - Macrografcet M4 relativo à alimentação do perfil a partir das cassetes.

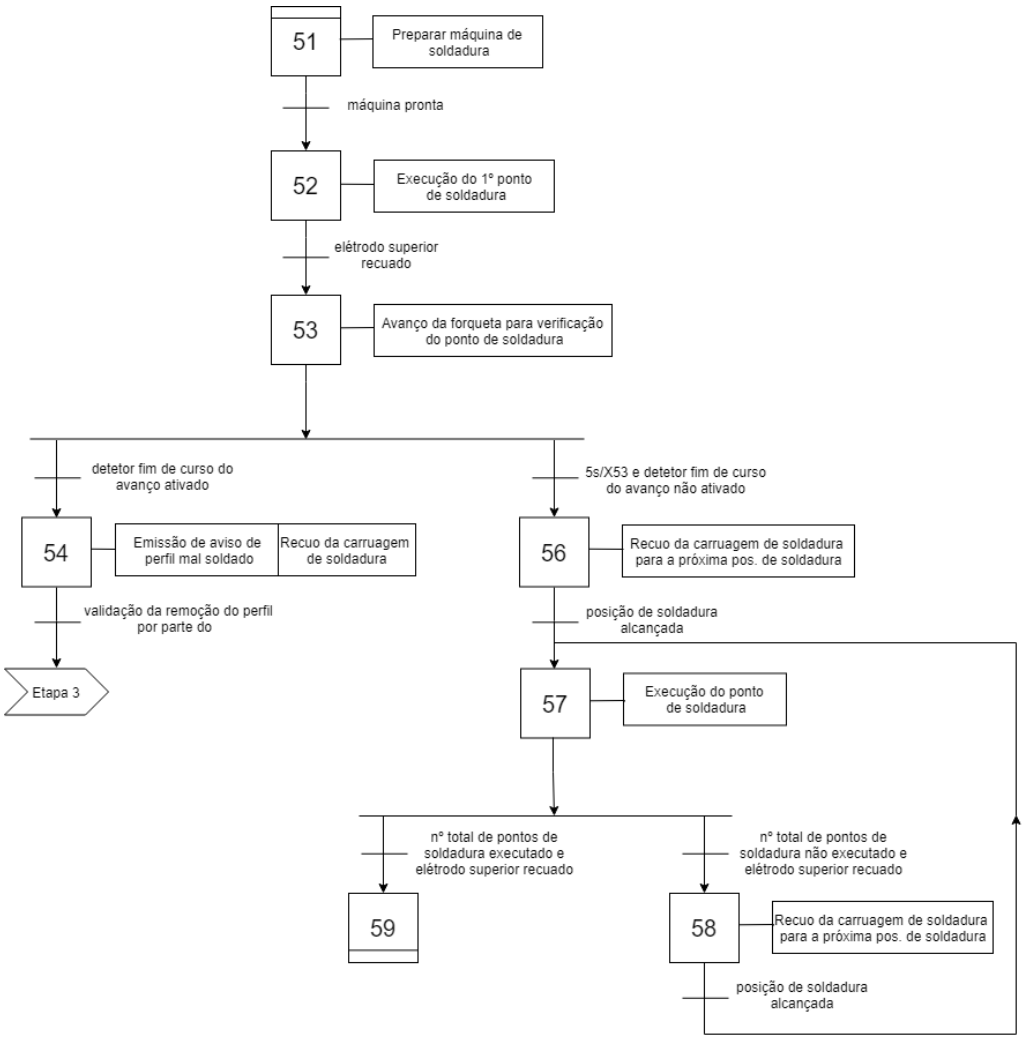


Figura C.9 - Macrografcet M5 da execução dos diferentes pontos de soldadura.

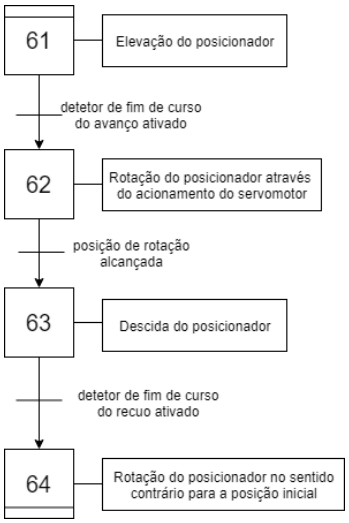


Figura C.10 - Macrografcet M6 do posicionamento da chapa.