



# ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA LINHA DE TAIPAIS PARA REBOQUES MULTIFUNÇÕES

**LEONARDO RODRIGUES PEREIRA**

outubro de 2023

# ***ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA LINHA DE TAIPAIS PARA REBOQUES MULTIFUNÇÕES***

Leonardo Rodrigues Pereira

**2022/2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

# **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA LINHA DE TAIPAIS PARA REBOQUE MULTIFUNÇÕES**

Leonardo Rodrigues Pereira

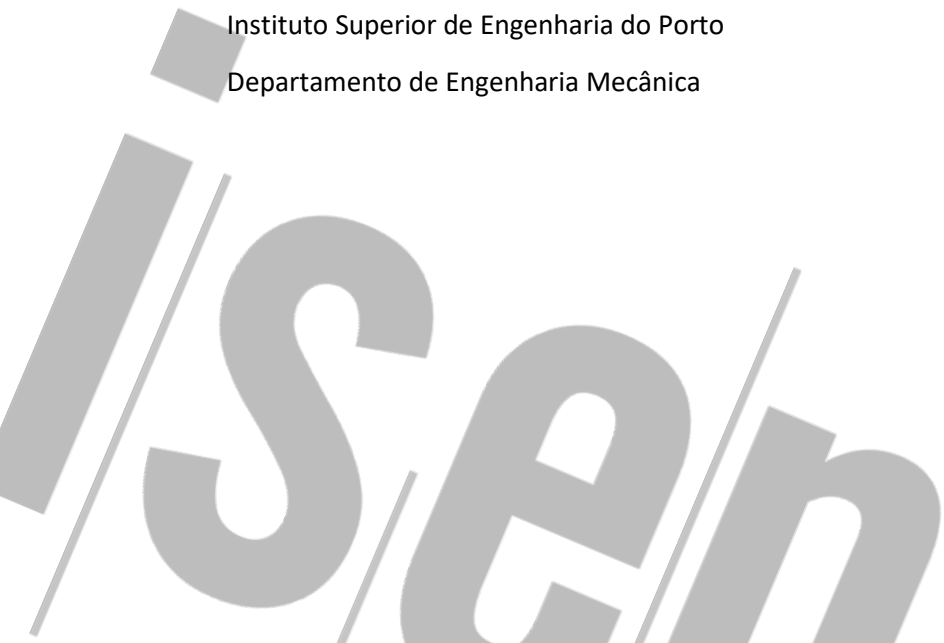
1181175

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação do Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

**2022/2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica







## **AGRADECIMENTOS**

À Herculano, pela possibilidade de realização do estágio curricular, pelo contacto com os trabalhadores e com a realidade industrial, que me permitiu crescer a nível profissional e pessoal. Agradeço em especial a todos os colegas que estiveram diretamente relacionados com o trabalho realizado.

Ao meu orientador na Herculano, Engenheiro José Luís da Silva Arieiro Mendes, pelo apoio, disponibilidade e experiência transmitida durante o meu percurso.

Ao meu orientador, Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientador, Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo interesse, compreensão e paciência apresentados durante o acompanhamento da minha dissertação. Obrigado pelo conhecimento e experiência partilhados que formam a base deste projeto e da minha futura vida profissional.

À minha família, aos quais devo todas as condições que me permitiram efetuar os estudos e pela atenção e preocupação com todos os pormenores que partilhei durante o decorrer do projeto.

À Inês, minha companheira, pelo carinho e apoio incondicional, por me ajudar a ser melhor e pelo orgulho que partilha em todas as minhas conquistas.

Aos amigos que se mostraram presentes durante a minha vida académica.

Finalmente, um agradecimento atencioso ao apoio financeiro disponibilizado pela Herculano.

Obrigado.



## RESUMO

A Herculano produz uma gama variada de semirreboques e a presente Dissertação envolve o estudo de uma nova linha de taipais, baseados em chapas perfiladas que constituem a caixa de alguns semirreboques fabricados. Um dos principais objetivos do projeto é a implementação de soldadura robotizada. A Herculano possui *robots* de soldadura cuja utilização no processo de fabrico dos taipais aumentaria a eficiência e automatização do processo. A maior dificuldade é conseguir soldar um perfil com várias ondulações/perfil complexo. Este problema provoca o levantamento de duas questões: se é possível aplicar a soldadura robotizada a perfis existentes na empresa, ou se é preciso conceber um novo perfil onde seja mais prático efetuar essa implementação. É ainda importante efetuar o estudo da relevância da perfilagem na resistência mecânica da chapa.

Após este primeiro passo, realizou-se um estudo de mercado com o objetivo de perceber o porquê de as empresas da concorrência utilizarem ou produzirem um outro tipo de taipal. Com isto em mente, foi coordenada uma visita à Ferpinta para averiguar a possibilidade de utilizar a perfiladora dessa empresa para produzir taipais que correspondam aos requisitos.

Dentro de uma mesma gama de semirreboques, existem várias funcionalidades e soluções diferentes para cada tipo de taipal. Os acessórios que permitem estas funcionalidade foram estudados para se perceber se devem ser trocados ou otimizados. Outras funcionalidades e elementos foram investigados com vista a uma possível melhoria do produto existente, com o intuito de oferecer uma gama mais diversificada e robusta de opções ao cliente.

A solução encontrada para o novo perfil apresenta resultados bastante positivos, principalmente na componente de resistência mecânica. Foram desenvolvidos os desenhos 3D e 2D das soluções concebidas e foi construído um protótipo. Finalmente, foram ajustados os parâmetros de soldadura para vários componentes e desenvolvido um novo desenho de montagem para um acessório que apresentava grande percentagem de defeitos.

## PALAVRAS-CHAVE

Semirreboques Agrícolas; Taipais; Perfilagem; Soldadura robotizada; Método dos Elementos Finitos.



## ABSTRACT

Herculano produces a wide range of semi-trailers, and this Dissertation involves the study of a new tails' line, the profiled sheets that form the box of the manufactured semi-trailers. One of the main objectives of the project is the implementation of robotic welding. Herculano has welding robots whose utilization into the manufacturing process of the tails would increase the efficiency and automation of the process. The biggest difficulty is to be able to weld a profile with deep wavy/complex profile. This problem raises two questions: whether it is possible to apply robotic welding to existing profiles in the company, or whether it is necessary to design a new profile where this implementation is more practical. It is also important to study the relevance of profiling in the mechanical strength of the sheet.

After this first step, a market study will be carried out with the aim of understanding why competing companies use or produce another type of tails. With this in mind, a visit to Ferpinta was coordinated to investigate the possibility of using the company's profiler equipment to produce tails that meet the requirements. Within the same range of semi-trailers, there are several functionalities and different solutions. The accessories that allow these functions were studied to understand if they should be changed or optimized. Other functionalities and elements were also investigated with a view to a possible improvement of the previous product, with the aim of offering a more diverse and robust range of options to the customer.

The solution found for the new profile presents very positive results, especially in the mechanical resistance component. 3D and 2D drawings of the designed solutions were developed and a prototype was built. Finally, welding parameters were adjusted for several components and a new assembly design was developed for an accessory that had a high percentage of defects.

## KEYWORDS

Agricultural Semi-trailers; Tails; Profiling; Robotic welding; Finite Element Analysis.



# ÍNDICE

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                          | VII  |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                                          | XI   |
| LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....                                                | XIII |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                              | 1    |
| 1.1. Contextualização .....                                                      | 1    |
| 1.2. Local e cronologia do trabalho .....                                        | 1    |
| 1.3. Objetivos .....                                                             | 1    |
| 1.4. Metodologia científica.....                                                 | 1    |
| 1.5. Estrutura da dissertação.....                                               | 2    |
| 2. Contextualização teórica.....                                                 | 3    |
| 2.1. Importância da indústria das alfaías agrícolas .....                        | 3    |
| 2.1.1. Importância da indústria das alfaías agrícolas no mundo .....             | 3    |
| 2.1.2. Importância da indústria das alfaías agrícolas em Portugal .....          | 4    |
| 2.2. Desenvolvimento do produto .....                                            | 5    |
| 2.2.1. Conceito “ <i>Design for X</i> ” e suas variantes .....                   | 5    |
| 2.2.2. Princípios de seleção de materiais e de processos de fabrico .....        | 8    |
| 2.2.3. Metodologia Seis-Sigma no desenvolvimento do produto.....                 | 10   |
| 2.2.4. Formulação de esforços e critérios de resistência.....                    | 12   |
| 2.2.5. Metodologia <i>Design Science Research</i> .....                          | 13   |
| 2.3. Processos de fabrico.....                                                   | 16   |
| 2.3.1. Soldadura por fusão .....                                                 | 16   |
| 2.3.1.1. Soldadura MAG .....                                                     | 16   |
| 2.3.1.2. Recentes avanços na soldadura MAG .....                                 | 20   |
| 2.3.1.3. Soldadura a <i>Laser</i> .....                                          | 21   |
| 2.3.2. Soldadura por resistência.....                                            | 23   |
| 2.3.3. Automação na soldadura .....                                              | 25   |
| 2.3.4. Comparação entre processos de soldadura.....                              | 26   |
| 2.3.5. Enformação de chapas finas .....                                          | 28   |
| 2.3.5.1. Dobragem.....                                                           | 28   |
| 2.3.5.2. Perfilagem .....                                                        | 30   |
| 2.4. <i>Design</i> assistido por computador e método dos elementos finitos ..... | 35   |
| 3. Caracterização da empresa, do processo e do problema .....                    | 37   |
| 3.1. Caracterização da Empresa .....                                             | 37   |
| 3.2. Caracterização do produto .....                                             | 37   |
| 3.2.1. Taipal traseiro .....                                                     | 38   |
| 3.2.2. Taipal lateral.....                                                       | 40   |
| 3.2.3. Taipal frontal .....                                                      | 41   |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. Caracterização do processo.....                                            | 42  |
| 3.3.1. Caracterização do processo de soldadura .....                            | 42  |
| 3.4. Caracterização do problema .....                                           | 43  |
| 3.4.1. Análise da soldadura .....                                               | 44  |
| 4. Análise da concorrência .....                                                | 51  |
| 4.1. Produtos concorrentes.....                                                 | 51  |
| 4.2. Análise SWOT aos produtos concorrentes.....                                | 52  |
| 4.3. Soluções a reter.....                                                      | 54  |
| 5. Desenvolvimento de soluções .....                                            | 55  |
| 5.1. <i>Brainstorming</i> .....                                                 | 55  |
| 5.2. Análise crítica das ideias.....                                            | 55  |
| 6. Projeto.....                                                                 | 59  |
| 6.1. Seleção do material e processos .....                                      | 59  |
| 6.1.1. Definição de propriedades chave e redução dos materiais candidatos ..... | 59  |
| 6.1.2. Definição da soldabilidade dos materiais candidatos.....                 | 61  |
| 6.1.3. Definição do peso para cada propriedade .....                            | 66  |
| 6.1.4. Escolha dos materiais e realização da matriz de seleção.....             | 67  |
| 6.2. Dimensionamento do perfil .....                                            | 67  |
| 6.2.1. <i>Design</i> inicial e cálculo de esforços instalados.....              | 67  |
| 6.2.2. Iteração do perfil inicial .....                                         | 69  |
| 6.2.3. Validação por simulação .....                                            | 73  |
| 6.2.3.1. Validação do perfil inicial .....                                      | 73  |
| 6.2.3.2. Análise da caixa de carga.....                                         | 76  |
| 6.2.3.3. Análise do taipal Ferpinta.....                                        | 83  |
| 6.3. Desenvolvimento dos acessórios .....                                       | 85  |
| 6.4. Definição dos parâmetros de soldadura .....                                | 85  |
| 6.5. Protótipo .....                                                            | 89  |
| 6.6. Análise crítica da solução desenvolvida .....                              | 90  |
| 6.6.1. Análise financeira.....                                                  | 91  |
| 7. Conclusões .....                                                             | 93  |
| 7.1. Contributos pessoais e para a empresa .....                                | 93  |
| 7.2. Trabalhos futuros .....                                                    | 94  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                | 95  |
| APÊNDICE A .....                                                                | 101 |
| ANEXO A .....                                                                   | 105 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Variação da mão-de-obra na agricultura entre 2005 e 2018 (Média do crescimento anual em %) (Adaptado de: Eurostat, 2022).....                                       | 4  |
| Figura 2 - Emprego na agricultura por 100 mil habitantes (Extraído de: Pordata, 2022).....                                                                                     | 4  |
| Figura 3 - Peso da agricultura no PIB de países europeus (Extraído de: Pordata, 2022).....                                                                                     | 5  |
| Figura 4 - Diagrama de Ashby - Resistência mecânica vs Densidade (Retirado de: Ashby,2011).....                                                                                | 9  |
| Figura 5 - Matriz de seleção de processos de fabrico PRIMA (Adaptado de: Swift & Booker, 2003).....                                                                            | 10 |
| Figura 6 – Ângulo de fricção da terra (Adaptado de: Watkins <i>et al</i> ,2010).....                                                                                           | 13 |
| Figura 7 - Ciclo de DSR (Takeda et al. (1990) adaptado por Vaishnavi & Kuechler, 2012) (adaptado pelo autor).....                                                              | 14 |
| Figura 8 - Processo de soldadura MAG (Retirado de: Silva, 2016).....                                                                                                           | 16 |
| Figura 9 – Esquema representativo de uma configuração semiautomática de soldadura MAG (Adaptado de: O'Brien, 2004) .....                                                       | 17 |
| Figura 10 - Relação V/A para uma fonte de alimentação de Tensão Constante (Silva, 2016).....                                                                                   | 17 |
| Figura 11 - Representação esquemática de uma tocha para soldadura MAG (Retirado de: Silva, 2016) .....                                                                         | 18 |
| Figura 12 - Diagrama esquemático da ponta de uma tocha MAG, com a indicação das distâncias a ter .....                                                                         | 18 |
| Figura 13 - Representação esquemática dos diferentes modos de transferência possíveis de encontrar no processo de soldadura MAG (Adaptado de: Silva, 2016).....                | 19 |
| Figura 14 - Princípio do processo de geração e concentração do feixe <i>laser</i> (Retirado de: Silva, 2016) .....                                                             | 21 |
| Figura 15 - Representação esquemática dos três modos de penetração (Adaptado de: Katayama, 2013) .....                                                                         | 22 |
| Figura 16 - Diferentes etapas de realização de uma soldadura por pontos (Retirado de: Silva, 2016) .....                                                                       | 23 |
| Figura 17 - Representação esquemática da soldadura por roletes (Retirado de: Silva, 2016).....                                                                                 | 23 |
| Figura 18 - Princípio de soldadura por projeção (Retirado de: Silva, 2016) .....                                                                                               | 24 |
| Figura 19 – Densidade de corrente necessária para diferentes materiais, na soldadura por resistência/pontos (Retirado de: Silva, 2016).....                                    | 24 |
| Figura 20 - Configurações típicas de <i>robots</i> de soldadura (Adaptado de: Norrish, 2006) .....                                                                             | 26 |
| Figura 21 – Nomenclatura de dobragem (Adaptado de: Kalpakjian <i>et al</i> ,2009) .....                                                                                        | 28 |
| Figura 22 - Esquema ilustrativo de uma quinadora (Adaptado de: ADH, 2023).....                                                                                                 | 29 |
| Figura 23 - Esquema ilustrativo do processo de perfilagem (Adaptado de: Tekkaya & Altan, 2012) .....                                                                           | 31 |
| Figura 24 - Exemplos de produtos que podem ser perfilados: a) secção aberta, b) secção fechada, c) perfil comprido, d) perfil curto (Retirado de: Tekkaya & Altan, 2012) ..... | 31 |
| Figura 25 - Secção de corte de uma base unilateral (Retirado de: Halmo, 2006).....                                                                                             | 32 |
| Figura 26 - Legenda de um veio de uma perfiladora (Adaptado de: Halmo, 2006).....                                                                                              | 32 |
| Figura 27 – Esquema de uma base dupla com uma ou duas bases ajustáveis (Adaptado de: Halmo, 2006) .....                                                                        | 33 |
| Figura 28 - Esquema de uma base convencional (Retirado de: Halmo, 2006) .....                                                                                                  | 33 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29 – Diagrama de flor (Retirado de: Halmo, 2006) .....                                                       | 34 |
| Figura 30 - Enformação por rolamento de um painel (Retirado de: Halmo, 2006) .....                                  | 35 |
| Figura 31 – Modelo 3D e respetivas vistas e dimensões criados utilizando um sistema CAD.....                        | 36 |
| Figura 32 - Semirreboque agrícola S1ET (Retirado de: Herculano, 2022).....                                          | 37 |
| Figura 33 - Perfil italiano utilizado .....                                                                         | 38 |
| Figura 34 - Vista aproximada do canto direito do taipal traseiro .....                                              | 39 |
| Figura 35 – Representação esquemática das possíveis situações de descarga traseira.....                             | 39 |
| Figura 36 – Vista aproximada do taipal lateral .....                                                                | 40 |
| Figura 37 – Corrente.....                                                                                           | 40 |
| Figura 38 - Taipal frontal .....                                                                                    | 41 |
| Figura 39 – Coluna.....                                                                                             | 41 |
| Figura 40 – Designação e características mecânicas do material de adição (Retirado de: Electroportugal, 2023) ..... | 43 |
| Figura 41 - Identificação da soldadura entre o perfil e o topo .....                                                | 43 |
| Figura 42 – Poro à superfície.....                                                                                  | 44 |
| Figura 43 - Cratera no final do cordão .....                                                                        | 44 |
| Figura 44 - Forma do cordão imperfeita .....                                                                        | 45 |
| Figura 45 - Assimetria do cordão (à esquerda). Excesso de material (à direita).....                                 | 45 |
| Figura 46 – Salpicos .....                                                                                          | 46 |
| Figura 47 - Legenda da secção transversal do cordão de soldadura (Retirado de: Fonseca, 2022).46                    |    |
| Figura 48 - Restrição identificada no <i>gabarit</i> .....                                                          | 48 |
| Figura 49 - Robot de soldadura a trabalhar lateralmente .....                                                       | 49 |
| Figura 50 - Perfil <i>Fuhrmann</i> (à esquerda) e Perfil <i>italiano</i> (à direita) .....                          | 51 |
| Figura 51 - Fecho com desacoplamento (Retirado de: Italautocar, 2022).....                                          | 52 |
| Figura 52 – Materiais de engenharia (Adaptado de: Ashby, 1999).....                                                 | 59 |
| Figura 53 - Nomenclatura do sistema de classificação de ligas de alumínio (Retirado de: Silva, 2022) .....          | 65 |
| Figura 54 - Matriz de seleção de materiais .....                                                                    | 67 |
| Figura 55 - Perfil <i>fuhrmann</i> modificado .....                                                                 | 68 |
| Figura 56 - Cálculo da esbelteza normalizada .....                                                                  | 69 |
| Figura 57 - Chapa trapezoidal Ferpinta (Ferpinta, 2023) .....                                                       | 70 |
| Figura 58 – Vista explodida da montagem da chapa trapezoidal Ferpinta com perfil FT 24.....                         | 71 |
| Figura 59 - Perfil FT Ferpinta (Ferpinta, 2023) .....                                                               | 72 |
| Figura 60 - Nova montagem da chapa trapezoidal Ferpinta com perfil FT 24.....                                       | 72 |
| Figura 61 - Fixação do taipal.....                                                                                  | 73 |
| Figura 62 - Aplicação das cargas na chapa .....                                                                     | 74 |
| Figura 63 - Malhas e propriedades da malha utilizadas.....                                                          | 74 |
| Figura 64 - Distribuição de tensão equivalente de <i>Von Mises</i> no perfil.....                                   | 75 |
| Figura 65 - Distribuição da deformação no perfil .....                                                              | 75 |
| Figura 66 - Caixa de carga .....                                                                                    | 76 |
| Figura 67 – Componentes do <i>chassi</i> .....                                                                      | 77 |
| Figura 68 – Vista aproximada da ligação caixa de carga- <i>chassi</i> .....                                         | 77 |
| Figura 69 - Aplicação de encastramento nas longarinas.....                                                          | 78 |
| Figura 70 - Ligação do tipo pino nas dobradiças .....                                                               | 78 |
| Figura 71 - Definição das cargas no DS <i>Solidworks</i> ® .....                                                    | 79 |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 72 - Ponto utilizado para retirar os dados para comparação.....                                                                                             | 80  |
| Figura 73 - Estudo de convergência da malha .....                                                                                                                  | 81  |
| Figura 74 - Tensões instaladas na dobradiça .....                                                                                                                  | 82  |
| Figura 75 - Exemplo de tensões residuais no modelo.....                                                                                                            | 82  |
| Figura 76 - Distribuição de tensão equivalente Von Mises instalada no modelo .....                                                                                 | 82  |
| Figura 77 - Distribuição do coeficiente de segurança do modelo.....                                                                                                | 83  |
| Figura 78 – Distribuição da deformação no modelo .....                                                                                                             | 83  |
| Figura 79 – Corrente típica – velocidade de alimentação do fio (Adaptado de: O’Brien, 2004) .....                                                                  | 86  |
| Figura 80 - Zonas típicas para cada modo de transferência em função da espessura do material de base e da intensidade de corrente (Retirado de: Silva, 2014) ..... | 87  |
| Figura 81 – Vista traseira do Protótipo .....                                                                                                                      | 89  |
| Figura 82 - Vista lateral do protótipo .....                                                                                                                       | 90  |
| Figura 83 - Desenho técnico da montagem do taipal lateral .....                                                                                                    | 101 |
| Figura 84 - Desenho técnico da montagem do fecho .....                                                                                                             | 102 |
| Figura 85 - Desenho técnico para processo da chapa trapezoidal.....                                                                                                | 103 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Aplicação de DFX (adaptado da elaboração de Kuo <i>et al.</i> , 2001) .....                                                                                             | 6  |
| Tabela 2 - Análise de casos de estudo DFX .....                                                                                                                                    | 7  |
| Tabela 3 - Tipos de requisitos do material .....                                                                                                                                   | 8  |
| Tabela 4 - Métodos de substituição de material (Adaptado de: Kutz, 2002) .....                                                                                                     | 9  |
| Tabela 5 - Valor Sigma e respectivos defeitos .....                                                                                                                                | 11 |
| Tabela 6 - Análise de casos de estudo Seis-Sigma .....                                                                                                                             | 11 |
| Tabela 7 - Análise de casos de estudo <i>Design Science Research</i> .....                                                                                                         | 15 |
| Tabela 8 - Quadro-Resumo da forma como cada parâmetro pode influenciar os diversos fatores que caracterizam o cordão de soldadura no processo MAG (Retirado de: Silva, 2016) ..... | 20 |
| Tabela 9 - Casos de estudo recentes no desenvolvimento na soldadura MAG .....                                                                                                      | 20 |
| Tabela 10 - Comparação das propriedades entre processos de soldadura (Swift & Booker, 2003) (Castro, 2011) (Kalpakjian et al., 2009) .....                                         | 27 |
| Tabela 11 – Nome técnico e funcionalidade de cada componente dos taipais.....                                                                                                      | 42 |
| Tabela 12 – Principais parâmetros utilizados no processo de soldadura .....                                                                                                        | 42 |
| Tabela 13 - Identificação e verificação dos defeitos de soldadura .....                                                                                                            | 47 |
| Tabela 14 - Defeitos identificados e possíveis causas (O’Brien, 2004) (Silva, 2014).....                                                                                           | 47 |
| Tabela 15 - Análise SWOT aos produtos da concorrência .....                                                                                                                        | 53 |
| Tabela 16 - Indicação do grau de viabilidade e impacto de cada sugestão .....                                                                                                      | 56 |
| Tabela 17 – Definição da viabilidade dos materiais .....                                                                                                                           | 60 |
| Tabela 18 - Importância geral das propriedades dos materiais a selecionar.....                                                                                                     | 60 |
| Tabela 19 - Tipos e classes de aços (retirado de: Modenesi, 2008).....                                                                                                             | 62 |
| Tabela 20 - Classificação de aços ao carbono (Retirado de: Modenesi, 2008) .....                                                                                                   | 62 |
| Tabela 21 - Classificação de aços ao carbono .....                                                                                                                                 | 63 |
| Tabela 22 - Cálculo do peso relativo das propriedades .....                                                                                                                        | 66 |
| Tabela 23 – Valores de carga utilizados na simulação .....                                                                                                                         | 73 |
| Tabela 24 - Tabela de estudo da convergência da malha .....                                                                                                                        | 80 |
| Tabela 25 - Tabela de comparação taipal Ferpinta e italiano .....                                                                                                                  | 84 |
| Tabela 26 - Análise do taipal Ferpinta para vários casos .....                                                                                                                     | 84 |
| Tabela 27 - Valores dos parâmetros adequados.....                                                                                                                                  | 86 |
| Tabela 28 – Sugestão de valores a utilizar para cada componente .....                                                                                                              | 87 |
| Tabela 29 – Cumprimentos dos objetivos.....                                                                                                                                        | 93 |



## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

| <Termo> | Designação                                                                     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 2D      | Duas Dimensões                                                                 |
| 3D      | Três Dimensões                                                                 |
| 5S      | Seiri, Seiton, Seisō, Seiketsu, Shitsuke                                       |
| AA      | <i>Aluminum Association</i>                                                    |
| AISI    | <i>American Iron and Steel Institute</i>                                       |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials</i>                              |
| BS      | <i>British Standards</i>                                                       |
| CAD     | <i>Computer-Aided Design</i>                                                   |
| CC      | Corrente contínua                                                              |
| CEP     | Controlo Estatístico de Processo                                               |
| CNC     | <i>Computer Numerical Control</i>                                              |
| DFCD    | <i>Design for Circularity and Durability</i>                                   |
| DFS     | <i>Design for Sustainability</i>                                               |
| DFX     | <i>Design for Excellence</i>                                                   |
| DMAIC   | <i>Define, Measure, Analyse, Improve, Control</i>                              |
| DS      | <i>Dassault Systèmes</i>                                                       |
| DSR     | <i>Design Science Research</i>                                                 |
| EN      | <i>European Standards</i>                                                      |
| GMAW    | <i>Gas Metal Arc Welding</i>                                                   |
| INEGI   | Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial |
| ISEP    | Instituto Superior de Engenharia do Porto                                      |
| ISO     | <i>International Organization for Standardization</i>                          |
| LSS     | <i>Lean Seis Sigma</i>                                                         |
| MAG     | <i>Metal Active Gas</i>                                                        |
| MEF     | Método dos Elementos Finitos                                                   |
| MS      | <i>Microsoft</i>                                                               |
| PIB     | Produto Interno Bruto                                                          |
| PRIMA   | <i>Process Information Maps</i>                                                |
| RRE     | Rede de Restauração e Extração                                                 |
| SAE     | <i>Society of Automotive Engineers</i>                                         |
| SIPOC   | <i>Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers</i>                          |
| SWOT    | <i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>                           |
| TIG     | <i>Tungsten Inert Gas</i>                                                      |
| ZTA     | Zona Termicamente Afetada                                                      |

**Lista de Símbolos**

| <Termo>  | Designação                              |
|----------|-----------------------------------------|
| %        | Porcentagem                             |
| €        | Euro                                    |
| A        | Intensidade de corrente                 |
| $\alpha$ | Ângulo de dobragem                      |
| c        | Distância ao eixo neutro                |
| C        | Carbono                                 |
| Ceq      | Carbono equivalente                     |
| Cr       | Crómio                                  |
| Cu       | Cobre                                   |
| E        | Módulo de elasticidade do material      |
| $f_y$    | Tensão de cedência do material          |
| H        | Altura da chapa                         |
| I        | Momento de Inércia                      |
| k        | Coefficiente de atrito da terra         |
| kg       | Quilograma                              |
| kW       | KiloWatt                                |
| kN       | KiloNewton                              |
| L        | Litro                                   |
| Lb       | Comprimento máximo de dobragem          |
| Lc       | Largura da chapa                        |
| Mf       | Momento Fletor                          |
| min      | Minuto                                  |
| mm       | Milímetro                               |
| Mn       | Manganês                                |
| Mo       | Molibdénio                              |
| MPa      | MegaPascal                              |
| M        | Metro                                   |
| Ni       | Níquel                                  |
| P        | Pressão total da terra                  |
| Pa       | Pascal                                  |
| R        | Raio de dobragem                        |
| R        | Redução de área quando sujeito à tração |
| Rm       | Raio mínimo de dobragem                 |
| Rr       | Raio de retorno elástico                |
| $\Sigma$ | Tensão                                  |
| T        | Espessura                               |
| V        | Diferença de potencial                  |

| <Termo>  | Designação                 |
|----------|----------------------------|
| $\Phi$   | Ângulo de fricção da terra |
| $\gamma$ | Peso próprio da terra      |
| $\mu$    | Micrómetro                 |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A Herculano possui uma grande variedade de produtos e é preponderante que cada um destes seja o melhor possível em termos de qualidade, custo e também em questões de inovação.

Os clientes são cada vez mais exigentes e requerem o melhor produto ao menor custo possível. Desta forma, para ser competitivo relativamente à concorrência, é necessário visitar todo o produto, desde o material, processo de fabrico, montagem, entre outros.

Dentro do contexto do projeto, foi estudada uma nova linha de taipais, as chapas perfiladas que constituem a caixa de carga dos semirreboques agrícolas. Com ênfase na melhoria, foram ajustados os processos de fabrico utilizados, alterando parâmetros e métodos. Foi realizada, também, uma análise da possibilidade de utilização de novos materiais. Por fim, foi efetuado o estudo de novas soluções para os componentes complementares que permitem todas as funcionalidades associadas aos taipais dos semirreboques.

## 1.2. Local e cronologia do trabalho

A Herculano é uma empresa do Grupo Ferpinta S.A. e está sediada na zona industrial de Loureiro, pertencente ao concelho de Oliveira de Azeméis, a 40 km do Porto e a 30 km de Aveiro.

O estágio tem a duração de 9 meses, tendo começado no dia 20 de setembro de 2022, e tendo terminado no dia 16 de junho de 2023.

## 1.3. Objetivos

O objetivo principal deste projeto foi o desenvolvimento de uma nova linha de taipais para um semirreboque multifunções.

Este objetivo está intimamente ligado à melhoria, sendo que não foi criado um produto novo de raiz. Pelo contrário, o grande objetivo é a otimização do processo produtivo do taipal, estudando a possibilidade de utilização de outro perfil que possa ser ligado através de soldadura robotizada, alterando ou modificando os componentes que revelam maiores problemas, sempre com atenção ao que é realizado pela concorrência.

## 1.4. Metodologia científica

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto foi a *Design Science Research* (DSR), abordagem que está focada na melhoria de processos existentes, como é o caso do presente projeto.

Foi efetuado um levantamento da situação atual, identificando problemas no processo e, consequentemente, definidos os objetivos a cumprir. Com isto, foi desenvolvida uma solução com o principal foco de solucionar o problema encontrado, cumprindo os objetivos. Este processo é

demorado por requerer uma análise mais detalhada, iterando várias vezes um protótipo para chegar a uma solução ideal, que cumpra todos os requisitos estipulados.

A metodologia DSR pode ser descrita pelas seguintes etapas (Kuechler & Vaishnavi, 2012):

- Identificação do problema – análise do produto e definição de objetivos;
- Sugestão – avaliação preliminar de possíveis soluções;
- Desenvolvimento – escolha de novos conceitos a implementar;
- Avaliação – análise do desempenho da solução e comparação com os objetivos definidos inicialmente;
- Conclusão – comparação entre as soluções obtidas.

### **1.5. Estrutura da dissertação**

A estrutura deste trabalho divide-se em sete capítulos principais: introdução, contextualização teórica, caracterização da empresa, do processo e do objetivo, análise da concorrência, desenvolvimento de soluções, projeto e conclusões. A introdução serve como enquadramento da dissertação. Neste capítulo é abordada a contextualização do tema, introduzido o local e cronologia de trabalho, definidos os objetivos, a metodologia científica aplicada e a estrutura da dissertação. Na contextualização teórica, foram desenvolvidos os fundamentos que formam a base do trabalho realizado. Em concreto, este capítulo explica, em detalhe, a relevância da indústria, aborda as metodologias científicas que serão aplicadas, assim como os processos de fabrico relevantes e outros conceitos fundamentais. No terceiro capítulo, foi realizada uma caracterização geral da empresa, uma caracterização mais aprofundada do produto, abordando todas as funcionalidades relevantes, do processo de fabrico e do problema. A sugestão foi efetuada no quarto e quinto capítulos, através da análise crítica dos produtos da concorrência e posterior *brainstorming* de ideias a implementar na melhoria do produto, seguida da seleção das ideias com maior impacto e viabilidade. No sexto capítulo, foram desenvolvidas e avaliadas as várias soluções. O processo de avaliação do *design* foi efetuado, utilizando a avaliação numérica do *software* DS Solidworks®, o qual permitiu a validação e iteração do perfil final. Ainda neste capítulo, é efetuada a comparação entre a solução desenvolvida e o perfil utilizado na empresa, segundo a componente de resistência aos esforços e financeira. Por último, o capítulo das conclusões, efetua a comparação entre os objetivos definidos e os resultados conseguidos.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Importância da indústria das alfaias agrícolas

Este subcapítulo apresenta o tópico relativo à importância da indústria das alfaias agrícolas no mundo e em Portugal.

#### 2.1.1. Importância da indústria das alfaias agrícolas no mundo

As alfaias agrícolas são equipamentos que trazem uma maior otimização e eficiência à indústria agrícola. Assim, explicando a importância da agricultura na economia global, por correlação, será entendida a importância da indústria de equipamentos agrícolas no mundo.

A agricultura é a fonte de alimentos de todo e qualquer país no planeta e, com o constante aumento da população, maior é a procura por bens alimentares. O setor agrícola impacta diretamente na economia através da contribuição de produtos, tanto alimentos como matéria-prima para vários setores não agrícolas, gerando um forte volume de emprego e permitindo exportações. Os países em desenvolvimento ainda possuem uma grande dependência do setor agrícola e a introdução das alfaias agrícolas permite um aumento significativo na produção de alimentos, permitindo um impacto notável na economia (Praburaj, 2018).

A agricultura produziu cerca de 434,3 milhares de milhões de euros em 2018 nos países da União Europeia, com valor bruto, subtraindo custos de serviço e matéria-prima, de 181,7 bilhões de euros. O valor bruto é equivalente a 1,1 % do PIB da União Europeia (Utvik *et al.*, 2019).

Na Figura 1 verifica-se um decréscimo, na generalidade, da mão de obra remunerada e não remunerada entre 2005 e 2018 neste setor. No entanto, entre o mesmo período, houve um aumento do volume de produção na União Europeia de cerca de 9,4 %, ou seja, com uma menor mão de obra, foi possível obter um aumento da produção, logo é possível concluir que a indústria agrícola se tornou mais eficiente. Este facto deve-se, em grande parte, à introdução de alfaias agrícolas, entre outros fatores, que permitem a redução da mão de obra, aumentando a automatização e caudal produtivo.

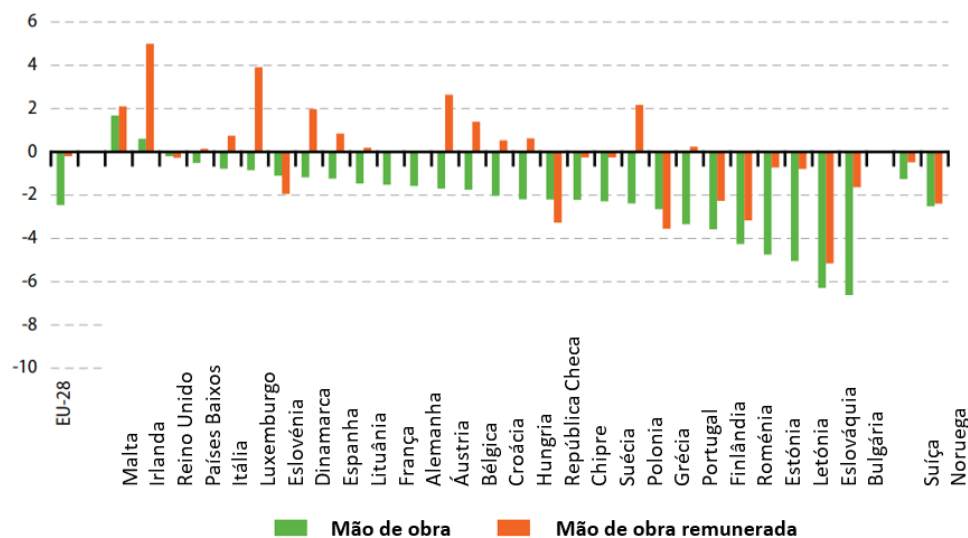


Figura 1 - Variação da mão-de-obra na agricultura entre 2005 e 2018 (Média do crescimento anual em %)  
(Adaptado de: Eurostat, 2022)

### 2.1.2. Importância da indústria das alfaías agrícolas em Portugal

Portugal é o quinto país na união europeia com maior número de agricultores por 100 mil habitantes, como se pode verificar na Figura 2.

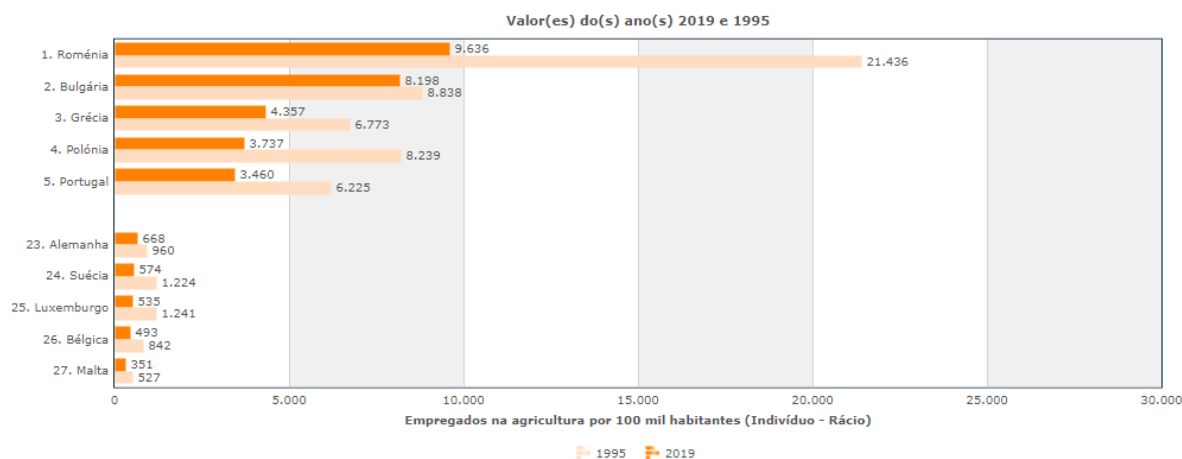


Figura 2 - Emprego na agricultura por 100 mil habitantes (Extraído de: Pordata, 2022)

Na Figura 3 é visível o peso da agricultura e das florestas em vários países europeus. Em concreto, este setor tem um peso no PIB de 1,6%, em Portugal.

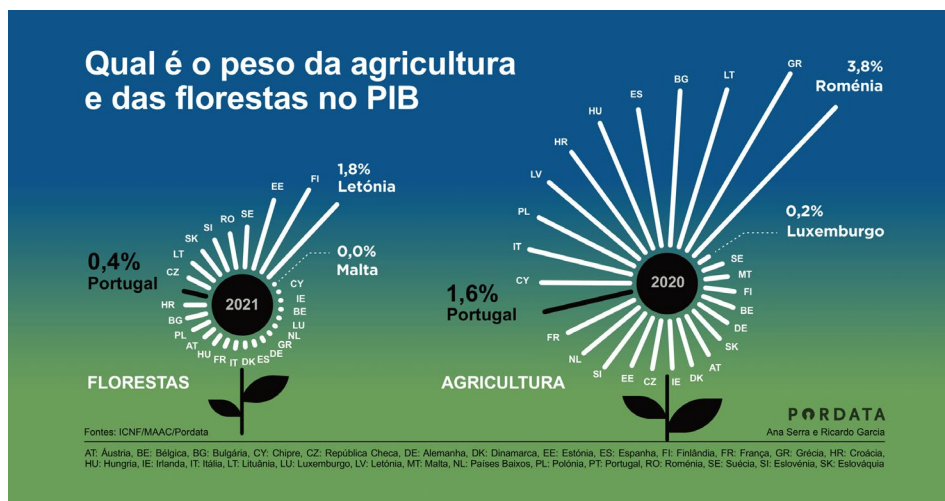


Figura 3 - Peso da agricultura no PIB de países europeus (Extraído de: Pordata, 2022)

Portugal é um país que ainda depende da agricultura para geração de emprego e exportações. No entanto, comparativamente com outros países da Europa, como por exemplo Itália e Espanha, tem o dobro dos trabalhadores no setor por cada 100 mil habitantes, produzindo um impacto igual na economia, revelando que a indústria agrícola em Portugal não é a mais produtiva.

Entende-se, então, que existe ainda espaço em Portugal para uma maior otimização da agricultura, com a introdução de alfaías agrícolas.

## 2.2. Desenvolvimento do produto

O presente subcapítulo explora e desenvolve as metodologias e formulações científicas aplicadas, sendo também abordados os processos de fabrico mais relevantes.

### 2.2.1. Conceito “Design for X” e suas variantes

O conceito “Design for X” (DFX) é uma metodologia de desenvolvimento de um componente, processo ou sistema, que visa a consideração de todos os aspetos para que seja obtida a melhor solução possível.

A partir de finais dos anos 70, foram realizados vários estudos com o objetivo da implementação do *design* focado na montagem, e mais tarde na manufatura. Estas aplicações trouxeram enormes benefícios, tais como a simplificação dos produtos, redução dos custos de montagem e manufatura, incremento da qualidade e diminuição do tempo de chegada ao mercado (Kuo *et al.*, 2001).

Em anos seguintes, estudos começaram a ter em conta questões ambientais no processo de *design*, mais concretamente, abordagens relativas à reciclagem, desmontagem, ciclo de vida, etc. Estes estudos eram algumas vezes referidos como DFX (Kuo *et al.*, 2001).

No entanto, a sigla DFX é originária da empresa AT&T *Bell Laboratories*, que atribuiu o termo à abordagem de *design* que incorpora todos os fatores desejáveis (Baptista *et al.*, 2018).

A Tabela 1 apresenta os vários pontos que integram o DFX e a sua respetiva aplicação.

Tabela 1 - Aplicação de DFX (adaptado da elaboração de Kuo *et al.*, 2001)

| <b>Tipo de <i>design</i></b>                                             | <b>Aplicação</b>                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Design</i> para a montagem/<br><i>Design for assembly</i>             | Desenvolvimento do produto para que a montagem seja a mais simples, rápida e económica.                                                                                                 |
| <i>Design</i> para a manufatura/<br><i>Design for manufacture</i>        | Desenvolvimento do produto tendo em conta o tipo de processo e material a ser utilizado.                                                                                                |
| <i>Design</i> para a desmontagem/<br><i>Design for disassembly</i>       | Desenvolvimento do produto tal que qualquer componente possa ser desmontado sem que danos sejam causados a este ou ao produto. Pretende igualmente facilitar separação para reciclagem. |
| <i>Design</i> para a reciclabilidade/<br><i>Design for recyclability</i> | Desenvolvimento do produto de forma a aumentar a utilização de recursos recicláveis e minimizar a potencial poluição de certos componentes.                                             |
| <i>Design</i> para o ambiente/<br><i>Design for environment</i>          | Desenvolvimento do produto considerando sistematicamente a segurança e sistema ambiental.                                                                                               |
| <i>Design</i> para o ciclo de vida/<br><i>Design for life-cycle</i>      | Desenvolvimento do produto tendo em conta consumos e o impacto que estes produzem durante todo o seu ciclo de vida.                                                                     |
| <i>Design</i> para a manutenção/<br><i>Design for maintainability</i>    | Desenvolvimento do produto tal que durante o seu ciclo de vida útil, seja possível a realização de manutenções sem qualquer dificuldade, a um custo razoável.                           |
| <i>Design</i> para a fiabilidade/<br><i>Design for reliability</i>       | Desenvolvimento do produto tal que a sua resistência seja significativamente maior do que as solicitações a que estará sujeito.                                                         |
| <i>Design</i> para a qualidade/<br><i>Design for quality</i>             | Desenvolvimento do produto tal que atinga os requisitos do cliente e que suporte ou minimize os efeitos de potenciais variações na manufatura e ambiente a que estará sujeito.          |

A aplicação da metodologia é apropriada quando o objetivo é a melhoria de um produto existente. Ao ter em conta todos estes aspetos mencionados na Tabela 1, algum esforço acrescido na fase inicial de *redesign* é necessário, mas que será compensado com vários benefícios, tais como:

- Melhor produto;
- A criação de um produto sem qualquer defeito, sem atrasos ou que necessite quaisquer alterações posteriores;
- Facilidade de produção do produto com custos mais reduzidos;
- Processamento pós vida útil facilitado;
- *Design* focado na segurança e saúde ambiental, o qual reduz o custo indireto do produto;
- Qualidade, manutenção e fiabilidade são garantidos pelo *design* e processos de controlo, em vez de testes e retrabalhos dispendiosos (Kuo *et al.*, 2001).

A Tabela 2 apresenta os resultados de casos de estudo que aplicaram a metodologia DFX no processo de *design*.

Tabela 2 - Análise de casos de estudo DFX

| Autor                 | Desenvolvimento e Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mesa, 2023            | O artigo propõe a classificação das regras DFX com base em estratégias de economia circular e traça uma diretriz denominada <i>Design for Circularity and Durability</i> (DFCD). O caso de estudo caracteriza as regras DFX existentes para as fases primárias de projeto, resultando em 51 regras. A diretriz DFCD serve como uma ferramenta de engenharia para aprimorar a circularidade no <i>design</i> de produtos, acomodando diversas estratégias e materiais. Trabalhos futuros incluem o refinamento das regras de circularidade para estratégias específicas, considerando a integração das tecnologias da Indústria 4.0 e abordando a circularidade em produtos não tangíveis, como <i>software</i> e serviços.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Favi et al., 2022     | O estudo foca-se na integração dos princípios do DFX em sistemas <i>Computer Assisted Drawing</i> (C3D) e apresenta um método geral que permite a ligação entre os vários pontos da metodologia DFX com características geométricas do modelo 3D de um produto. A estrutura DFX integrada em CAD proposta, facilita a coleção sistemática de regras, auxiliando no desenvolvimento do produto e identificando problemas de montagem. A abordagem permite que os projetistas partilhem conhecimento explícito, aprimorando as tarefas de engenharia. O caso do estudo demonstra a eficiência do método, reconhecendo problemas de montagem, mesmo em montagens complexas. O artigo descreve benefícios como ciclos reduzidos de revisão de projetos, partilha de conhecimento e potencial para iniciativas de ensino. Trabalho futuro envolve o desenvolvimento de ferramentas de <i>software</i> , avaliação ampliada de indicadores-chave de desempenho e integração de modelos analíticos para avaliação de sustentabilidade. |
| Marinelli, 2022       | O estudo explora a transferência da abordagem " <i>Design for Sustainability</i> " (DFS) do setor de manufatura para o setor de construção, propondo uma abordagem de planeamento, tendo em conta a sustentabilidade em projetos de infraestruturas. O estudo identifica e transforma as metas do DFX em objetivos equivalentes para projetos de infraestrutura, alinhando-se com a economia, o meio ambiente e a sociedade. Estratégias bem conhecidas de gestão de construção, incluindo análise custo-benefício e aquisições orientadas para a sustentabilidade, são reconhecidas como ferramentas DFS vitais para a integração da sustentabilidade. O planeamento da sua contribuição em relação aos objetivos do DFS permite escolhas estratégicas informadas no planeamento de projetos, alinhadas com as prioridades de sustentabilidade. Investigação futura deverá expandir a abordagem, analisar a implementação sob diferentes vias e explorar sinergias a partir da utilização integrada de estratégias.            |
| Atilano et al., 2019  | O caso de estudo aplica a metodologia <i>LeanDFX</i> , em concreto, <i>design</i> tendo em conta a integridade estrutural e a manutenção de um braço de <i>robot</i> . A metodologia <i>LeanDFX</i> surge da combinação da abordagem <i>Lean</i> e <i>Design for "X"</i> . Através de um processo contínuo e iterativo, aplicando a metodologia em domínios de integridade estrutural e manutenção, foram corrigidas partes inefetivas do <i>design</i> e melhorados os resultados de eficiência que anteriormente eram medíocres. A abordagem ajuda a identificar áreas que precisam de melhoria, levando a uma melhor tomada de decisões durante o desenvolvimento do produto.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Baptista et al., 2018 | A abordagem <i>LeanDFX</i> é introduzida para a avaliação sistemática do <i>design</i> de um produto. Foram utilizados um índice de avaliação <i>LeanDFX</i> e uma tabela de desempenho para efetuar uma avaliação eficaz em vários domínios DFX. Foi aplicado a uma dobradeira, domínios de DFX: <i>Ecodesign</i> , Otimização Estrutural e <i>Design</i> Modular. A metodologia <i>LeanDFX</i> mostrou-se eficaz, oferecendo uma perspetiva holística através de verificação cruzada de camadas e domínios de produtos, auxiliando na tomada de decisão nas etapas de <i>design</i> . A integração como módulo de <i>software</i> em sistemas legados, facilitaria o uso diário pelas equipes técnicas e de <i>design</i> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

### 2.2.2. Princípios de seleção de materiais e de processos de fabrico

O grande número de materiais e os vários processos de manufatura existentes, acompanhado de complexas relações entre os diferentes parâmetros de seleção, fazem do processo de escolha de um material, na maioria das vezes, para um dado componente, uma tarefa bastante difícil (Kutz, 2002).

Numa primeira fase, devem ser considerados todos os materiais. De seguida, são especificadas quais as propriedades que o material precisa apresentar para servir o propósito. Os requisitos de desempenho de um dado material podem ser divididos em cinco categorias: requisitos funcionais, de processamento, custo, fiabilidade e resistência às condições de serviço (Kutz, 2002).

Na Tabela 3 é possível ver as categorias dos materiais e o seu significado.

Tabela 3 - Tipos de requisitos do material

| Requisitos do material              | Relação                                                                                   |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Requisitos funcionais               | Diretamente relacionados com as características necessárias do produto                    |
| Requisitos de processamento         | Capacidade de um material ser processado e obtido o produto final                         |
| Custo                               | Custo associado à matéria-prima e ao custo de processamento                               |
| Fiabilidade                         | Probabilidade de o material executar a sua função no período de vida expectável sem falha |
| Resistência às condições de serviço | Resistência às condições ambientais                                                       |

Uma vez atribuídos limites das propriedades, são eliminados materiais que não cumpram os requisitos, ou até mesmo grupos inteiros de materiais. Gráficos de seleção de materiais de Ashby podem ser usados, também, nesta fase inicial.

A Figura 4 mostra um gráfico que apresenta a tensão de cedência em função da densidade do material, sendo visíveis os vários grupos de materiais. Definindo valores máximos e mínimos destas propriedades, visualmente é possível eliminar vários grupos de materiais. Ainda é possível garantir um valor mínimo de tensão de cedência sobre densidade, utilizando as retas a tracejado no canto inferior direito do gráfico, para restringir ainda mais as opções de escolha do material.

Complementando os diagramas de Ashby, pode ser utilizado o *software* Granta EduPack®, que possui uma base de dados para materiais e permite restringir as propriedades que se consideram necessárias, conseguindo uma lista final de grupos de materiais. De seguida, devem ser considerados os materiais mais aptos, considerando a combinação de todas as propriedades necessárias, de cada grupo para efetuar uma seleção final.

Após a seleção dos possíveis candidatos de material a serem aplicados, utilizando os métodos descritos acima, podem ser utilizados métodos de comparação/*ranking* dos materiais. Um destes métodos é o cálculo do índice de *performance* de material. Esta abordagem compara as propriedades escolhidas dos materiais selecionados entre si, multiplicando os valores pelo peso da propriedade. Esse peso é tanto maior quanto mais relevante for a propriedade para a aplicação. Da soma destes valores ponderados, resulta o índice de desempenho do material. O material com

maior índice, é o mais apto para a aplicação. Existem também métodos de substituição de materiais e estes estão apresentados na Tabela 4, assim como a sua aplicação.

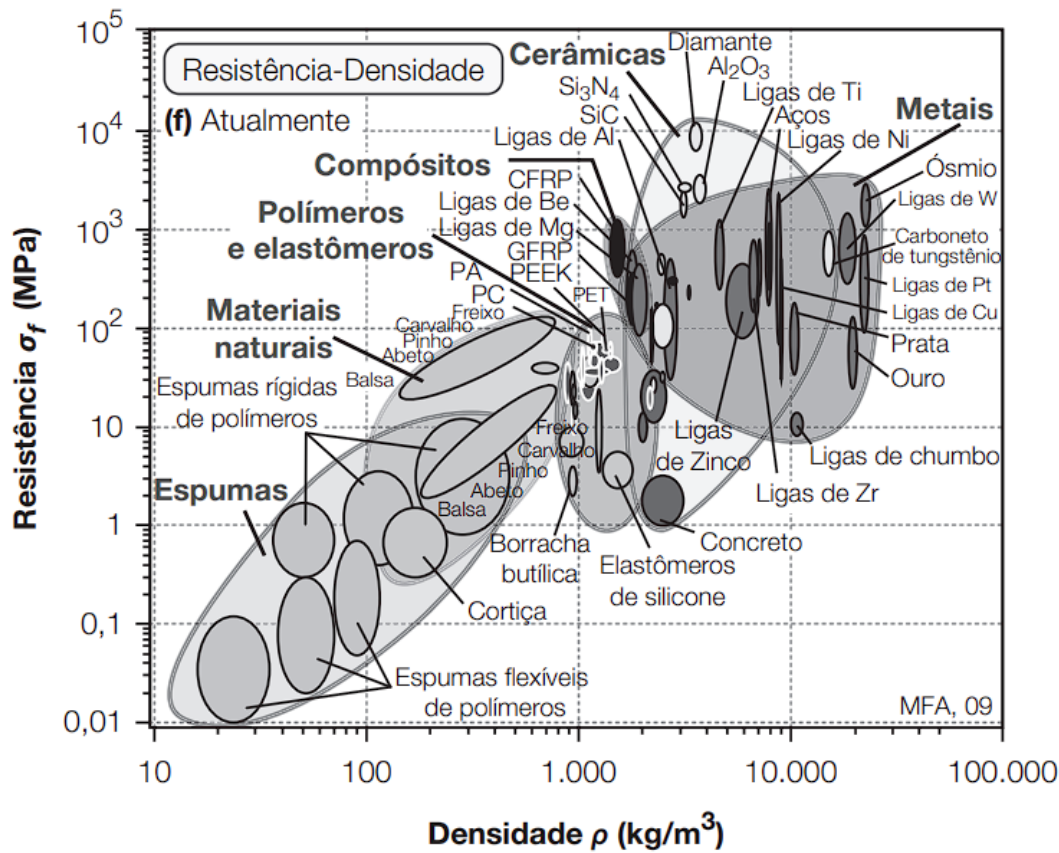


Figura 4 - Diagrama de Ashby - Resistência mecânica vs Densidade (Retirado de: Ashby,2011)

Tabela 4 - Métodos de substituição de material (Adaptado de: Kutz, 2002)

| Método          | Aplicação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pugh            | Utilizado numa fase mais inicial.<br>Numa matriz de decisão, são comparadas as propriedades de cada possível novo material com o material usado. A comparação é feita usando (+) quando a propriedade é mais favorável, (-) quando a propriedade é menos favorável e (0) quando esta é neutra. Os materiais com maior número de propriedades favoráveis do que de propriedades não favoráveis, são os principais candidatos à aplicação.                                                   |
| Custo-Benefício | Análise mais apropriada para uma fase de decisão final.<br>Este método dita que o ganho económico resultante da melhoria de desempenho, deve ser maior do que o custo associado à substituição do material.<br>O custo da substituição do material é igual à soma entre o custo direto do material, de processamento, de <i>redesign</i> , dos testes, de novas ferramentas e equipamentos.<br>O ganho económico pode ser estimado através do aumento do índice de desempenho do material. |

A seleção do processo de fabrico está intimamente ligada à escolha do material. Isto porque os processos são possíveis de se efetuar para um determinado grupo ou número de materiais.

Para explorar diferentes opções de métodos de fabrico, é necessária a obtenção das características de vários processos de manufatura, de ligação e de montagem. Esta informação está presente nos **PRocess Information MAPs** (PRIMAs). Estes mapas apresentam, para cada processo, conhecimento sobre a adequabilidade dos materiais, considerações de *design*, questões económicas e de qualidade, fundamentos do processo e suas variantes (Swift & Booker, 2003).

Na Figura 5 encontra-se uma matriz PRIMA que permite efetuar uma primeira restrição dos processos de fabrico candidatos, condicionando em relação ao material e quantidade de produção. Inicialmente, devem ser obtidos valores relevantes para a seleção do processo como, por exemplo, quantidade de produção anual, tipo de material e espessura. Partindo destes dados, são escolhidos os processos adequados da matriz PRIMA (Figura 5). De seguida, são considerados requisitos económicos e técnicos, a fim de reduzir mais um pouco os processos de fabrico candidatos, podendo ser utilizadas as matrizes PRIMA específicas para cada processo. Por fim, são tidos em conta fatores do negócio, considerando uma estimativa dos custos do componente e/ou montagem, a qualidade do produto final, questões de entrega e de estratégias de negócio (Swift & Booker, 2003).

| MATERIAL<br>QUANTIDADE               | FERROS                                              | AÇO<br>(carbono)                                     | AÇO<br>(ferramenta,<br>liga)                         | AÇO<br>INOXIDÁVEL                                    | COBRE<br>E LIGAS                                     | ALUMÍNIO<br>E LIGAS                                  | MAGNÉSIO<br>E LIGAS                                  | ZINCO<br>E LIGAS                                     | ESTANHO<br>E LIGAS                                   | CHUMBO<br>E LIGAS                                    | NÍQUEL<br>E LIGAS                                    | TITÂNIO<br>E LIGAS                                   | TERMOPLÁSTICOS          | TERMOFÓS                | COMPOSTOS FR            | CERÂMICAS               | METAL REFRATÁRIOS       | METAL REFRATÁRIOS       |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| MUITO BAIXA<br>1 A 100               | [3.5][3.7]<br>[3.7][6M]<br>[7.1][7.4]               | [3.5][3.7]<br>[4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.5][7.6]      | [3.1][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.5][7.6] | [3.5][3.7]<br>[4.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.5][7.6] | [3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1]                    | [3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[6M][7.5]                | [3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]               | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]               | [3.1][3.6][4.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]          | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] |
| BAIXA<br>100 A 1.000                 | [3.2][3.5]<br>[3.5][3.7]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.1][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.7]<br>[4.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]          | [3.2][3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.3][7.4]          | [3.2][3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.3][7.4]          | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.1][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.5]                    | [3.5][3.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]               | [3.1][3.6][4.7]<br>[4.10][6M]<br>[7.1][7.5]          | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] |
| FERROBAIXA A MÉDIA<br>1.000 A 10.000 | [3.2][3.5]<br>[3.5][3.7]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [3.2][3.5]<br>[3.7][4.10]<br>[6M][7.1]<br>[7.3][7.4] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] |
| MÉDIA A ALTA<br>10.000 A 100.000     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                    | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] |
| ALTA<br>100.000+                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                    | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [3.2]<br>[3.3]<br>[4.11]<br>[6A]                     | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] | [5.5]<br>[5.5]<br>[5.5] |
| TODAS AS<br>QUANTIDADES              | [3.1]                                               | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                                                | [3.1]                   | [3.1]                   | [3.1]                   | [3.1]                   | [3.1]                   | [3.1]                   |

#### CHAVE PARA MATRIZ MIP DE SELEÇÃO DE PROCESSO DE MANUFATURA

| PROCESSOS DE FUNDAÇÃO                   | PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO             | PROCESSAMENTO DE PLÁSTICOS E COMPOSTOS     | PROCESSOS DE USINAGEM    | PROCESSOS DE USINAGEM NÃO TRADICIONAL      |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| (3.1) FUNDAÇÃO EM AREIA                 | (4.1) FORJAMENTO                     | (5.1) MOLDAGEM POR INJEÇÃO                 | (6A) USINAGEM AUTOMÁTICA | (7.1) USINAGEM POR ELETROEROSÃO (EDM)      |
| (3.2) MOLDAGEM EM CASCA                 | (4.2) LAMINAÇÃO                      | (5.2) MOLDAGEM POR INJEÇÃO                 | (6M) USINAGEM MANUAL     | (7.2) USINAGEM ELETROQUÍMICA (ECM)         |
| (3.3) FUNDAÇÃO POR GRAVIDADE            | (4.3) TREFILAÇÃO                     | (5.3) MOLDAGEM POR COMpressão              |                          | (7.3) USINAGEM POR FEIXE DE ELÉTRONS (EBM) |
| (3.4) FUNDAÇÃO SOB PRESSÃO              | (4.4) CONFORMAÇÃO A FRIJO            | (5.4) MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA |                          | (7.4) USINAGEM POR FEIXE DE LASER (LBM)    |
| (3.5) FUNDAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO        | (4.5) RECÁLQUE AXIAL A FRIJO         | (5.5) TÊRMOFORMAGEM                        |                          | (7.5) USINAGEM QUÍMICA (CM)                |
| (3.6) FUNDAÇÃO POR CERA PERDIDA         | (4.6) FORJAMENTO ROTATÓRIO           | (5.6) MOLDAGEM POR SOPRO                   |                          | (7.6) USINAGEM POR ULTRASSOM (USM)         |
| (3.7) FUNDAÇÃO COM MOLDE DE CERÂMICA    | (4.7) CONFORMAÇÃO A FRIJO            | (5.7) FOTOMOLDAÇÃO                         |                          | (7.7) USINAGEM POR JATO ABRASIVO (AJM)     |
| (3.8) FUNDAÇÃO COM MOLDE DE GESSO       | (4.8) ESTAMPAGEM DE CHAPAS           | (5.8) MOLDAGEM POR CONTATO                 |                          |                                            |
| (3.9) FUNDAÇÃO POR EXTRUSÃO SOB PRESSÃO | (4.9) REPUXO                         | (5.9) PULTRUSÃO                            |                          |                                            |
|                                         | (4.11) METALURGIA DOS PÓS            | (5.10) EXTRUSÃO CONTÍNUA (PLÁSTICOS)       |                          |                                            |
|                                         | (4.12) MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE METAL |                                            |                          |                                            |
|                                         | (4.13) EXTRUSÃO CONTÍNUA (METAIS)    |                                            |                          |                                            |

Figura 5 - Matriz de seleção de processos de fabrico PRIMA (Adaptado de: Swift & Booker, 2003)

### 2.2.3. Metodologia Seis-Sigma no desenvolvimento do produto

A metodologia “seis-sigma” evoluiu da letra grega *sigma*, que representa variação normal no campo da estatística, e o desvio característico de um serviço ou processo. A escala *sigma* é uma medida universal de como uma característica se comporta, neste caso, de um processo ou de um produto, relativamente aos requisitos previamente definidos.

O nível de qualidade máxima entendida pela metodologia, o nível *sigma* seis, está relacionado com um desvio de defeitos de 3,4 por milhão de oportunidades, ou seja 0,00034%. Entende-se que para esta quantidade de defeitos/erros, o produto final teria sempre um desempenho excepcional (Antony, 2006).

A Tabela 5 apresenta a quantidade de defeitos associada a cada nível *sigma*.

Tabela 5 - Valor Sigma e respectivos defeitos

| Sigma | % de defeitos | Defeitos por milhão |
|-------|---------------|---------------------|
| 1     | 69%           | 691,462             |
| 2     | 31%           | 308,538             |
| 3     | 6.7%          | 66,807              |
| 4     | 0.62%         | 6,210               |
| 5     | 0.023%        | 233                 |
| 6     | 0.00034%      | 3.4                 |
| 7     | 0.000019%     | 0.019               |

O foco da metodologia não é a contagem dos defeitos, mas sim a identificação do número de situações durante o processo de fabrico que podem resultar em defeitos, e o desenvolvimento de estratégias para reduzir a variação (Antony, 2006). A aplicação de seis-sigma em produtos existentes, em grande parte, é conseguida aplicando o ciclo DMAIC, que apresenta cinco etapas: *Define* (Definir), *Measure* (Medir), *Analyse* (Analisar), *Improve* (Melhorar), *Control* (Controlar). Em concreto, devem ser efetuadas a definição e medição do problema, análise de dados, melhoria dos processos e controlo para impedir problemas posteriores e verificar benefícios.

Na Tabela 6 é apresentado o impacto da aplicação da metodologia Seis Sigma em alguns casos de estudo.

Tabela 6 - Análise de casos de estudo Seis-Sigma

| Autor                | Desenvolvimento e Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Guleria et al., 2021 | Este estudo indica a importância da melhoria contínua no setor da manufatura para obter lucro, utilizando ferramentas <i>Lean</i> Seis Sigma (LSS) para eliminar desperdícios e melhorar a produção. Um importante fabricante de componentes de transmissão automóvel que enfrenta problemas de rejeição num componente de um eixo traseiro, motivou o caso de estudo. O LSS foi aplicado, resultando em melhorias significativas: a taxa de rejeição do eixo traseiro diminuiu de 10,4% para 3,20%, a área de chão de fábrica foi reduzida de 252 m <sup>2</sup> para 90 m <sup>2</sup> através do <i>redesign</i> do <i>layout</i> , a distância de deslocamento do material diminuiu de 4.050 m para 809 m, e o nível sigma melhorou de 3,34 a 3,94. A principal ferramenta utilizada para melhorar a produção foi o Mapeamento do Fluxo de Valor. Os 5S não eram utilizados e foram incorporado, assim como outras ferramentas Seis Sigma para reduzir defeitos e desperdício, tais como Termo de Abertura de Projeto, matriz SIPOC, entre outros. O estudo demonstra a eficácia do LSS na melhoria do processo de fabrico. |

Tabela 6 - Análise de casos de estudo Seis-Sigma (continuação)

| Autor                 | Desenvolvimento e Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ferreira et al., 2019 | Este trabalho apresenta a metodologia <i>iLeanDMAIC</i> , que aplica ferramentas <i>Lean</i> e o ciclo DMAIC, oferecendo uma solução prática para resolução de problemas. Um caso de estudo do sector de produtos de madeira validou a abordagem, demonstrando a sua eficácia no aumento da produção. O <i>iLeanDMAIC</i> reduziu significativamente o tempo de troca de <i>setup</i> numa máquina de montagem em 44% (de 39 para 17 minutos).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Barbosa et al., 2017  | O estudo realizado numa fábrica de pneus da Continental em Portugal teve o objetivo de melhorar o desempenho da máquina APEX e da qualidade do produto. A metodologia Seis Sigma foi utilizada para identificar os principais fatores que influenciam a qualidade da produção. O ciclo DMAIC facilitou a análise estruturada, permitindo identificar as causas que impactavam negativamente o processo estudado, assim como oportunidades de melhoria. A utilização do Controlo Estatístico do Processo (CEP) no sistema de controlo de qualidade do fabrico dos pneus, ajudou a reduzir as não conformidades. Após um período de seis meses de análise e experimentação, o número de não conformidades reduziu e foi alcançada uma melhoria significativa no índice de qualidade (41%), verificando-se ainda melhorias no controlo e capacidade do processo.                                                                                                                                               |
| Costa et al., 2017    | Devido às mudanças dinâmicas do mercado, as organizações, especialmente no setor automóvel, devem procurar excelência operacional por meio da adaptabilidade contínua e redução de custos. Foi desenvolvido um estudo numa empresa fabricante de pneus com o objetivo de melhorar o processo de extrusão de borracha de dois semi-produtos: a banda de rodagem e a parede lateral. Foi adotada a metodologia Seis Sigma e o ciclo DMAIC. A aplicação permitiu uma redução de 0,89% no indicador de material não conforme, gerando 165.000 € em poupanças anuais. A aplicação da metodologia Seis Sigma, assim como as ferramentas associadas, permitiram a identificação e intervenção eficiente em problemas como rejeição de material durante a preparação de trabalho, e em problemas de alimentação. A abordagem sistemática DMAIC permitiu maior eficiência, produtividade e economia de custos, evidenciando o papel do Seis Sigma na obtenção de uma produção simplificada com qualidade aprimorada. |

#### 2.2.4. Formulação de esforços e critérios de resistência

Aproximando o taipal a um muro de contenção de terra, é possível obter a pressão aplicada por parte da carga. A distribuição da pressão lateral da terra aumenta linearmente com a profundidade, ou seja, no sentido descendente da altura do taipal (Weber, 2012). Este valor é máximo na base do taipal e nulo na parte superior do taipal. Seguindo o guia de cálculo de pressão lateral da terra nestes muros de Weber, algumas considerações foram realizadas.

Primeiro, é considerada a categoria “ao descanso”, no caso em que o muro se encontra na vertical. O valor de pressão total da terra,  $P$ , é calculado segundo a equação (1).

$$P = \frac{1}{2} K \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (1)$$

Com  $K$ , coeficiente de atrito da terra,  $\gamma$ , o peso próprio da terra e  $H$ , a altura da chapa.

O valor de  $K$  ao descanso é calculado da seguinte forma (2):

$$K = 1 - \sin(\phi) \quad (2)$$

O valor de  $\phi$ , ângulo de fricção da terra, segundo Watkins et al. (2010), depende da qualidade da terra.



Figura 6 – Ângulo de fricção da terra (Adaptado de: Watkins et al,2010)

De seguida, apresenta-se a inequação de avaliação de resistência (Beer et al, 2011),

$$\sigma_{admissível} \leq \frac{\sigma_{aplicada}}{c.s} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (3)$$

A tensão aplicada devido ao momento fletor é igual a,

$$\sigma_{aplicada} = \frac{Mf * c}{I} \quad (4)$$

Através desta equação, podemos concluir que a tensão admissível da chapa à flexão é tanto maior, para um mesmo material, quanto maior for o momento de inércia, que varia consoante o perfil. Desta forma, o *design* de um novo taipal, em termos de resistência, deve visar a maximização/aumento do momento de inércia.

### 2.2.5. Metodologia *Design Science Research*

A pesquisa científica designada por *Design Science Research* (DSR), é uma abordagem de investigação qualitativa, especialmente apropriada para a melhoria de produtos existentes. Esta metodologia envolve um processo rigoroso na criação e avaliação de um objeto/artefacto, para

resolver um problema observado, bem definido. DSR é uma metodologia de pesquisa científica e é, portanto, definida por princípios, regras e procedimentos (Peffer *et al.*, 2007).

Hevner *et al.* (2004, adaptado por Peffer *et al.*, 2007, p.51) listou uma série de regras práticas para a condução de DSR, sob a forma de sete orientações que descrevem quais as características que uma investigação bem realizada deve possuir. O mais importante é que a investigação deve produzir um artefacto criado para resolver um problema. Além disso, o artefacto deve ser relevante para a solução de um problema até agora não resolvido e importante. A sua utilidade, qualidade e eficácia devem ser rigorosamente avaliadas. A investigação deve representar uma contribuição verificável e o rigor deve ser aplicado tanto no desenvolvimento do artefacto, como na sua avaliação. O desenvolvimento do artefacto deve ser um processo de pesquisa que se baseie em teorias e conhecimentos existentes, para encontrar uma solução para um problema definido. Por último, a investigação deve ser comunicada aos públicos apropriados.<sup>1</sup>

A aplicação da metodologia é habitualmente realizada através do modelo de Takeda et al. (1990).

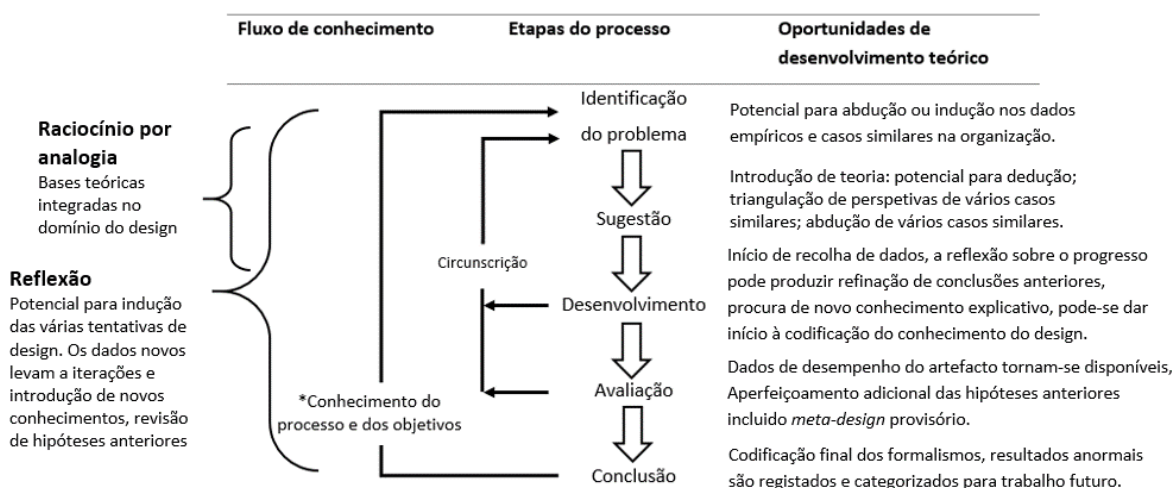


Figura 7 - Ciclo de DSR (Takeda et al. (1990) adaptado por Vaishnavi & Kuechler, 2012) (adaptado pelo autor)

O processo parte da identificação dos problemas e, de seguida, a sugestão de várias soluções que se desenvolvem num artefacto. O cariz iterativo da metodologia permite que os modelos e soluções sejam refinados e avaliados.

<sup>1</sup> Tradução do autor - Hevner et al. (2004, adaptado por Peffer & Tunanen, 2007, p.41) provided us with practice rules for conducting DSR in the IS discipline in the form of seven guidelines that describe characteristics of well carried out research. The most important of these is that the research must produce an artifact created to address a problem. Further, the artifact should be relevant to the solution of a heretofore unsolved and important business problem. Its utility, quality, and efficacy must be rigorously evaluated. The research should represent a verifiable contribution and rigor must be applied in both the development of the artifact and its evaluation. The development of the artifact should be a search process that draws from existing theories and knowledge to come up with a solution to a defined problem. Finally, the research must be effectively communicated to appropriate audiences.

A Tabela 7 apresenta casos de estudo de aplicação da metodologia DSR no desenvolvimento do produto.

Tabela 7 - Análise de casos de estudo *Design Science Research*

| Autor                        | Desenvolvimento e Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Gaspar, 2022)               | A dissertação em questão teve como objetivo o desenvolvimento de equipamento de enformação de arame com elevada flexibilidade e produtividade, partindo de um equipamento menos produtivo já existente. O equipamento desenvolvido permite atingir elevadas cadências de produção, 950 peças por horas, superando a meta estabelecida de 800 peças por hora. O tempo de <i>setup</i> foi reduzido para 30 minutos. O custo do novo equipamento foi reduzido de 160.000 € para 121.575 € e o custo das ferramentas de 50.000 € para 6.000 €.                                           |
| (Eiras, 2022)                | A dissertação descreve o desenvolvimento de um equipamento automático e flexível, que permite integrar vários processos de fabrico individuais já existentes. O equipamento desenvolvido produz 1440 peças por hora, cadência superior às máquinas mais modernas na empresa e com elevada flexibilidade, podendo ser utilizados diferentes diâmetros de cabo e revestimentos. O custo do equipamento é 10.000 € inferior ao estimado, e substancialmente inferior às ofertas do mercado. A segurança do operador foi melhorada, uma vez que se encontra afastado das zonas de perigo. |
| (Tojal <i>et al.</i> , 2021) | O caso de estudo em questão tem como objetivo a diminuição do desgaste de certos componentes que estão sujeitos a altas temperaturas num equipamento de fundição por injeção. A aplicação da metodologia DSR conduziu a um aumento em 1100% do tempo de trabalho das peças em estudo, redução do custo de aquisição das peças em 58%, redução do tempo de manutenção corretiva em 55%, assim como otimização do processo de manufatura, aumento do tempo de trabalho do equipamento, diminuição do consumo de peças sobressalentes e aumento da eficiência e eficácia do produto.     |
| (Oruç <i>et al.</i> , 2021)  | O artigo apresenta o desenvolvimento de um programa de gestão de processos pessoais que permite facilitar processo de recursos humanos. Foram realizados planeamentos em dois cenários distintos usando 50 participantes e o programa desenvolvido. Os participantes demoraram 19 e 55 minutos para realizar os planos, enquanto o programa demorou 10 e 3 segundos, respetivamente.                                                                                                                                                                                                  |
| (Kao <i>et al.</i> , 2016)   | A metodologia DSR foi aplicada no desenvolvimento de um sistema inteligente de gestão de um hospital em <i>Taiwan</i> . O sistema criado permite fácil acesso a indicadores de gestão médica, permitindo administradores e profissionais melhorar questões de correção e oportunidade de ações clínicas, obtendo redução de problemas e aumentando a eficiência geral. As ferramentas analíticas do programa permitem melhorar a tomada de decisões, tanto do hospital, como dos sistemas administrativos.                                                                            |

O objetivo da metodologia DSR, de uma forma geral, é a criação de um artefacto que possa solucionar um problema bem definido num dado processo ou componente. Os casos de estudo acima, demonstram que a aplicação da metodologia induz resultados significativos, como redução de tempo de manutenção corretiva, custos de aquisição de peças e aumento de cadências produtivas, em conjunto com o aumento da flexibilidade do equipamento (Tojal *et al.*, 2021; Gaspar, 2022; Eiras, 2022). O programa desenvolvido por (Oruç *et al.*, 2021) apresenta resultados qualitativos bastante consideráveis, mas que não são resultantes diretamente da aplicação da metodologia, mas sim, também da comparação entre o programa desenvolvido e um participante na realização da mesma tarefa. Entende-se que a aplicação da metodologia permitiu que o programa fosse refinado ao longo do tempo e que este foi mais eficiente e capaz do que se a metodologia não fosse aplicada. Vários outros casos de estudo, como (Kao *et al.*, 2016), pretendem tornar-se o suporte para a aplicação bem definida da metodologia na sua respetiva área.

## 2.3. Processos de fabrico

Este subcapítulo apresenta os fundamentos dos processos de fabrico mais relevantes no contexto da dissertação.

### 2.3.1. Soldadura por fusão

Os processos de ligação por fusão promovem a ligação entre duas peças, através da aplicação de energia sob a forma de calor, a qual funde total ou parcialmente ambas as partes e as liga, com ou sem material de adição.

#### 2.3.1.1. Soldadura MAG

*Metal Active-Gas* (MAG) é um processo de soldadura por fusão no qual o calor necessário para fundir as peças é obtido através de energia elétrica, mais propriamente, um arco elétrico formado entre as peças a ligar e um elétrodo consumível. Uma atmosfera gasosa protege a fusão, transporte do material de adição e banho de fusão, prevenindo oxidação e contaminação (Castro, 2011) (Kalpakjian et al., 2009). A figura 8 apresenta uma representação esquemática do processo.

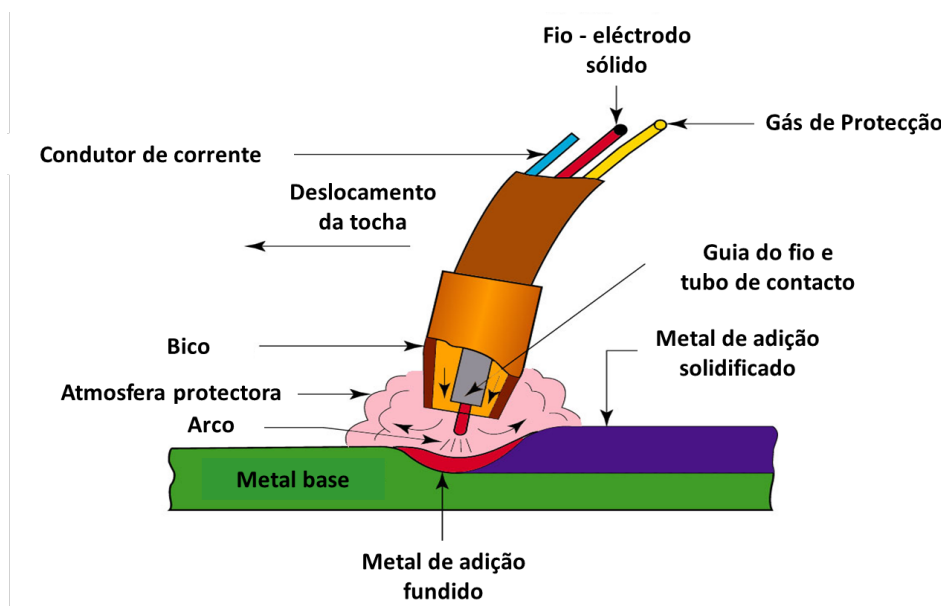


Figura 8 - Processo de soldadura MAG (Retirado de: Silva, 2016)

## Equipamento

O processo de soldadura MAG envolve a utilização dos seguintes componentes: fonte de alimentação de corrente elétrica, fonte de gás, unidade de alimentação do fio de adição, tocha de soldadura, caixa de comando, redutor e debitômetro (Silva, 2016).

A Figura 9 apresenta uma configuração típica de um sistema semiautomático de soldadura MAG.

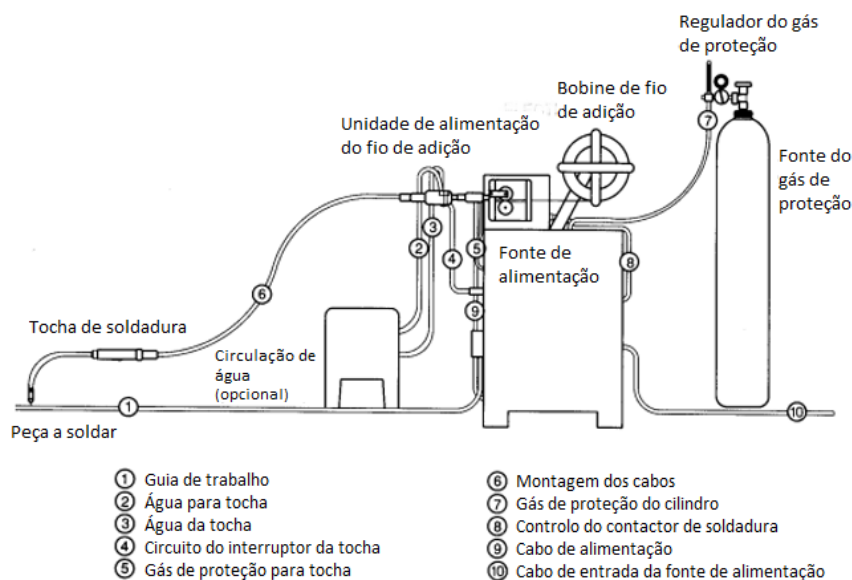


Figura 9 – Esquema representativo de uma configuração semiautomática de soldadura MAG (Adaptado de: O'Brien, 2004)

As **fontes de alimentação** podem ser construídas para fornecer corrente ou diferença de potencial constante (CC). Para o processo MAG, utilizam-se fontes de diferença de potencial constante e, em conjunto com uma unidade de alimentação do fio de adição com velocidade constante, consegue manter um comprimento do arco elétrico também constante, caso o processo seja automatizado. Na Figura 10 verifica-se a relação Diferença de Potencial – Intensidade de Corrente para uma fonte de alimentação com curva característica de Tensão Constante.

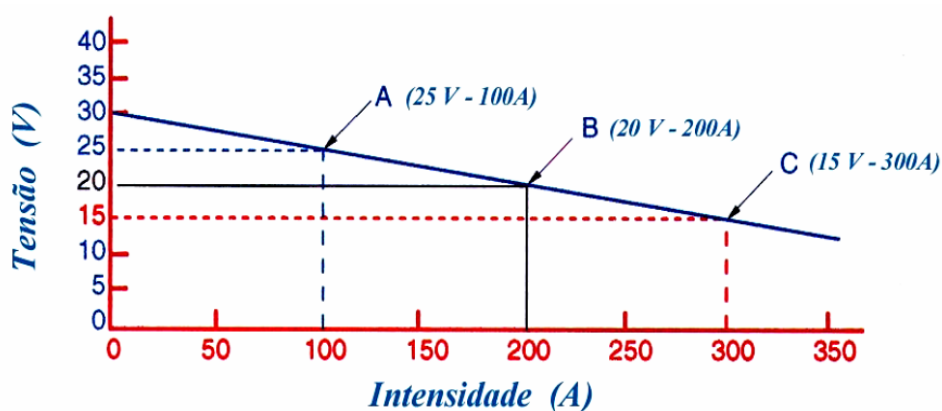


Figura 10 - Relação V/A para uma fonte de alimentação de Tensão Constante (Silva, 2016)

A **tocha de soldadura** (Figura 11) é responsável pela alimentação do fio de material de adição e do gás de proteção. Possui, também, a função de transmissão da energia elétrica ao fio do metal de adição, assim como a regulação do fluxo gasoso (Silva, 2016).

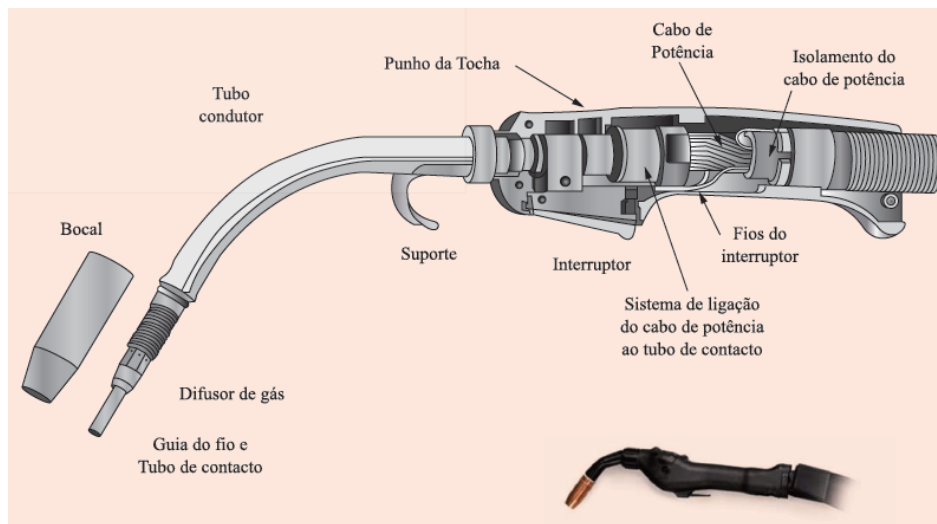


Figura 11 - Representação esquemática de uma tocha para soldadura MAG (Retirado de: Silva, 2016)

O **tubo de contacto**, normalmente em cobre, transfere a corrente elétrica para o fio e guia-o ao metal base. Como se verifica na Figura 12, o bocal estende-se para além do tubo de contacto. Portanto, o fio de metal de adição deixa de ser guiado ainda dentro do bocal. A distância livre do fio dentro do bocal é chamada de *setback* e a distância livre fora do bocal de *stick-out*. O somatório destas distâncias é chamado de extensão livre do eléctrodo e é um parâmetro importante, sendo que para uma taxa de depósitos e velocidade de alimentação do fio fixas, o aumento da extensão livre do eléctrodo leva a uma diminuição da intensidade de corrente (O'Brian, 2004) (Silva, 2016).

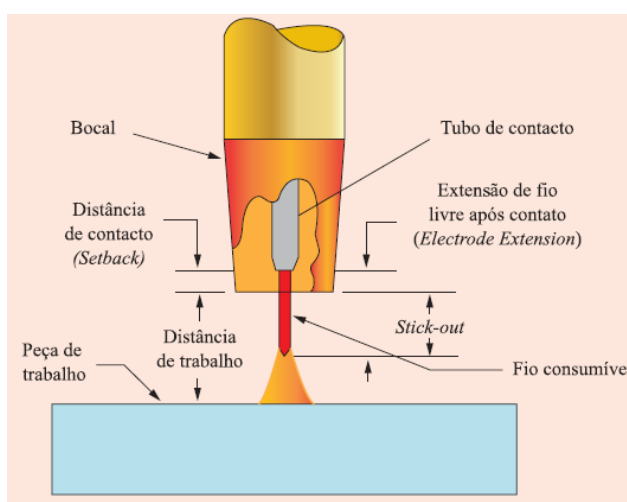


Figura 12 - Diagrama esquemático da ponta de uma tocha MAG, com a indicação das distâncias a ter em consideração neste processo (Retirado de: Silva, 2016)

Na maioria dos casos, o material de adição é praticamente igual ao material base. A composição do fio pode ser alterada para compensar perdas no arco de soldadura, ou para promover desoxidação (O'Brien, 2004).

### Modos de transferência

Os modos de transferência podem ser: por curto-circuito, globular ou por *spray* (Silva, 2016).

O primeiro dá-se quando o fio de adição é transferido para o material base, no momento em que o eletrodo está em contato com o banho de fusão e vários curtos-circuitos repetidos se sucedem. Este modo trabalha com intensidade de corrente mais baixa e diâmetros de eletrodos relativamente baixos, pelo que é apropriado para pequenas espessuras do material base.

O modo de transferência globular caracteriza-se pela transferência do material de adição sob a forma de gota de diâmetro maior do que o do eletrodo. Utiliza uma intensidade de corrente ligeiramente superior à comum no modo por curto-circuito.

A transferência por *spray* ocorre para valores mais elevados de intensidade de corrente e de diferença de potencial, gerando pequenas gotas de metal fundido. Este modo de transferência, devido à elevada intensidade de corrente utilizada, não é apropriado para baixas espessura, pois pode furar ou cortar o material.

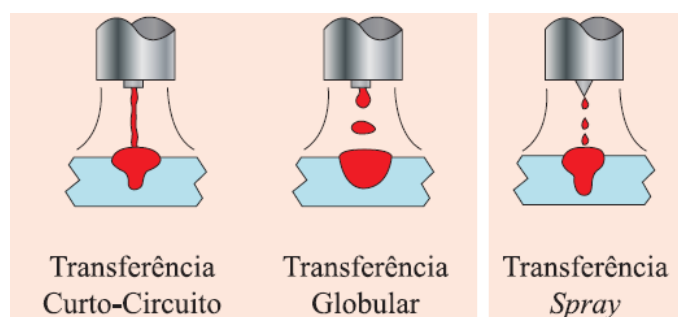


Figura 13 - Representação esquemática dos diferentes modos de transferência possíveis de encontrar no processo de soldadura MAG (Adaptado de: Silva, 2016)

### Parâmetros

Os parâmetros que alteram diretamente a qualidade do cordão de soldadura são: a intensidade da corrente, a tensão e comprimento do arco, velocidade de soldadura, extensão livre do eletrodo, posição da tocha, diâmetro do eletrodo, assim como o fluxo e tipo de gás de proteção. Todos estes parâmetros são ajustados a cada projeto em específico e, dentro destes, e depois de selecionado o fio de material de adição em função da espessura do material a ligar e o gás a utilizar, o soldador regula apenas a intensidade de corrente, a diferença de potencial de saída da fonte, a velocidade de alimentação do fio, o fluxo de gás, a velocidade e a posição da tocha. Parâmetros como a intensidade de corrente e diferença de potencial, como referido anteriormente, afetam o modo de transferência que irá ocorrer (Silva, 2016).

A Tabela 8 apresenta um quadro resumo com a influência de vários parâmetros no cordão de soldadura.

Tabela 8 - Quadro-Resumo da forma como cada parâmetro pode influenciar os diversos fatores que caracterizam o cordão de soldadura no processo MAG (Retirado de: Silva, 2016)

| Variáveis de soldadura para modificar                         | Modificações desejadas |            |                   |   |                               |   |                   |            |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|------------|-------------------|---|-------------------------------|---|-------------------|------------|
|                                                               | Penetração             |            | Taxa de deposição |   | Área da secção reta do cordão |   | Largura do cordão |            |
|                                                               | ↑                      | ↓          | ↑                 | ↓ | ↑                             | ↓ | ↑                 | ↓          |
| Corrente e vel. alim. arame                                   | ↑                      | ↓          | ↑                 | ↓ | ↑                             | ↓ | +                 | +          |
| Tensão                                                        | +                      | +          | *                 | * | *                             | * | ↑                 | ↓          |
| Velocidade de soldadura                                       | +                      | +          | *                 | * | ↓                             | ↑ | ↓                 | ↑          |
| Extensão do eletrodo                                          | ↓                      | ↑          | ↑                 | ↓ | ↑                             | ↓ | ↑                 | ↓          |
| Diâmetro do arame                                             | ↓                      | ↑          | ↓                 | ↑ | *                             | * | +                 | +          |
| Gás de proteção %CO <sub>2</sub>                              | ↑                      | ↓          | *                 | * | *                             | * | *                 | *          |
| Ângulo da tocha                                               | puxando a 25°          | empurrando | *                 | * | *                             | * | puxando           | empurrando |
| * Sem efeito    + Pequeno efeito    ↑ aumento    ↓ diminuição |                        |            |                   |   |                               |   |                   |            |

### 2.3.1.2. Recentes avanços na soldadura MAG

Os recentes desenvolvimentos no âmbito da soldadura MAG incidem na introdução de modelos e sistemas sensoriais que permitem aumentar a eficiência do processo. Os casos de estudo analisados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Casos de estudo recentes no desenvolvimento na soldadura MAG

| Referência                      | Análise                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Shivegowda <i>et al.</i> , 2022 | A soldadura CMT ( <i>Cold Metal Transfer</i> ) é uma versão modificada da soldadura GMAW ( <i>Gas Metal Arc Welding</i> ) que envolve a retração intencional do fio de material de adição após um curto-circuito, reduzindo a transferência de calor e minimizando salpicos. Estes fatores tornam a soldadura CMT ideal para unir chapas finas e pratos. A técnica permite a união de diversos materiais, como alumínio e aço, e proporciona excelente estabilidade do arco, tornando-a adequada para diversas aplicações e posições. Nos últimos anos, a soldadura CMT ganhou popularidade devido às suas vantagens, incluindo redução de zonas termicamente afetadas (ZTA), distorção mínima, aumento de produtividade e ausência de salpicos. Tem sido usado para unir metais semelhantes e diferentes, incluindo aços de alta resistência e ligas como alumínio, cobre e magnésio. |

### 2.3.1.3. Soldadura a *Laser*

Neste processo, o calor que funde o metal base é gerado pela absorção de um feixe de luz de elevada potência. Este feixe, ou *laser*, pode ser concentrado numa área bastante reduzida, gerando uma alta densidade de energia e uma elevada penetração. Este método de soldadura por fusão ganhou grande popularidade, especialmente na indústria automóvel. O *laser* pode ser pulsado para soldadura localizada em chapas finas, ou contínuo, para a soldadura de secções espessas (Kalpakjian et al., 2009) (Swift & Booker, 2003).

Na soldadura a *laser*, por norma, não é utilizado metal de adição. Portanto, as peças que serão ligadas não devem estar distanciadas mais do que 15% da espessura do componente mais fino. Também, como a soldadura é bastante rápida, as peças devem estar limpas, já que os contaminantes não são queimados. O processo possui três modos de soldadura que são conseguindo alterando os parâmetros do processo e o sistema ótico. O modo de condução apresenta um cordão superficial, semelhante aos processos MAG e *Tungsten Inert Gas* (TIG). No modo de penetração, consegue-se uma maior profundidade em detrimento da largura do cordão. O modo *keyhole* aumenta ainda mais a profundidade conseguida no processo de soldadura.

Uma representação esquemática do processo está representada na Figura 14.

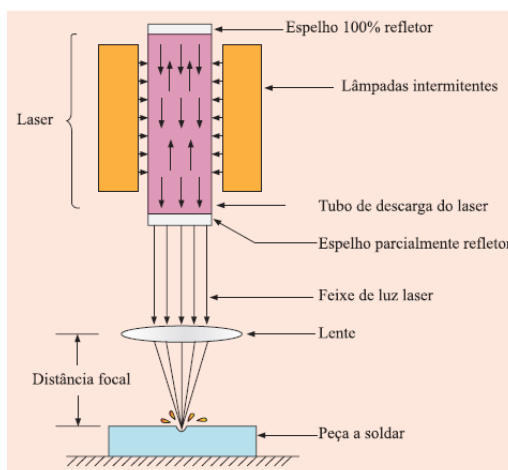


Figura 14 - Princípio do processo de geração e concentração do feixe *laser* (Retirado de: Silva, 2016)

Na Figura 15 estão representados de forma esquemática os três modos de soldadura.

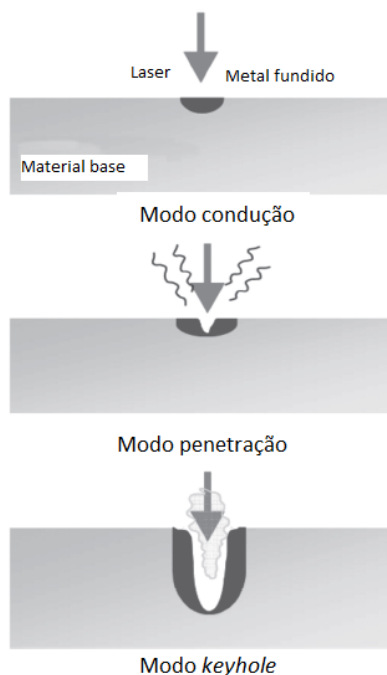


Figura 15 - Representação esquemática dos três modos de penetração (Adaptado de: Katayama, 2013)

### **Tipos de *laser* utilizado**

Os *lasers* mais utilizados na indústria metalomecânica são: CO<sub>2</sub>, Nd:YAG e Fibra Ótica.

O *laser* do tipo CO<sub>2</sub> opera na gama infravermelho, com comprimentos de onda de cerca de 10,6 µm, trabalhando com potências entre 1 e 15 kW. Possui cerca de 20% de eficiência, considerada elevada quando comparada com a dos restantes tipos de *laser*, e o meio ativo que gera o *laser* é uma mistura gasosa de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H e He. O laser Nd:Yag opera da mesma forma na região infravermelho, com comprimento de onda de 1,06 µm, e apresenta uma eficiência bastante menor do que o laser CO<sub>2</sub>, entre 1 a 4%. Trabalha com potências entre 0,05 kW e 5 kW, e o meio ativo é Nd<sup>3+</sup>: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. O *laser* de fibra ótica é assim chamado porque o meio ativo é fibra ótica dopada com elemento de terra rara. Opera numa intervalo de potências entre 15 e 30 kW e apresenta uma eficiência de 30% (O'Brian, 2004) (Silva, 2016)(Katayama, 2013).

### **Parâmetros**

A profundidade e largura do cordão de soldadura são afetados pela qualidade do feixe *laser* e as características da focagem ótica. Quanto maior a qualidade do feixe, mais estreito e profundo será o cordão, independentemente de qualquer outro parâmetro. Também, um comprimento focal mais curto promove da mesma forma a diminuição da largura e o aumento da profundidade do cordão (Silva, 2014).

Considerando o *laser* pulsado, vários parâmetros são controlados como: pico de densidade de potência, controlo da largura do impulso, frequência de fornecimento de impulsos, diâmetro do feixe e precisão do sistema de posicionamento.

### 2.3.2. Soldadura por resistência

A soldadura por resistência é um processo que dá uso à resistência à passagem da corrente elétrica entre dois materiais para gerar calor suficiente para gerar fusão. O calor é gerado de uma forma localizada, fundindo as peças num ponto específico com o uso de pressão (Swift & Booker, 2003).

As resistências que se opõem à passagem de corrente são a resistência interna dos elétrodos, resistência da interface entre os elétrodos de cobre e as peças a serem soldadas, a resistência do próprio material base e a resistência mais considerável, a da interface de contacto entre as peças a soldar (Silva, 2016).

Existem três variantes do processo: soldadura por pontos, por roletes e por bossa/projeção. Estes possuem o mesmo princípio de funcionamento já mencionado. As etapas do processo de soldadura por pontos estão apresentadas na Figura 16.

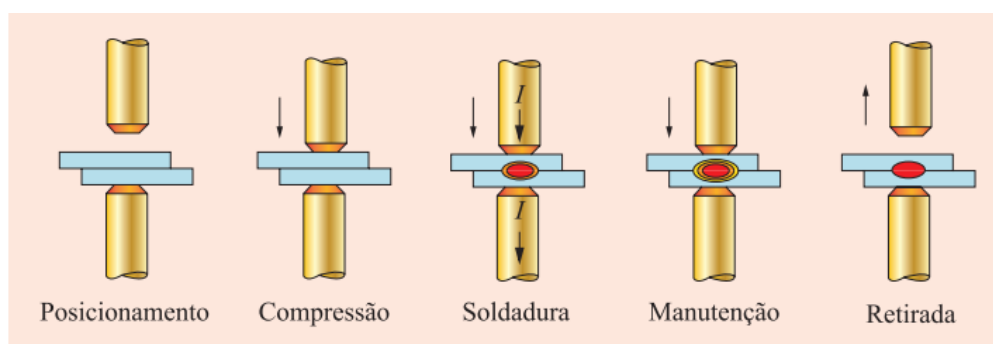


Figura 16 - Diferentes etapas de realização de uma soldadura por pontos (Retirado de: Silva, 2016)

O ciclo de soldadura por resistência/pontos começa pelo contacto dos elétrodos com a peça e aplicação da pressão. De seguida, é aplicada corrente elétrica, fazendo-se a soldadura num único impulso e, por fim, é mantida a pressão até que o núcleo solidifique, procedendo-se ao afastamento dos elétrodos em conjunto com a movimentação da peça para efetuar novo ponto de soldadura. Na soldadura por roletes (Figura 17), a pressão é efetuada por dois discos e a alimentação é por impulsos. A ligação dá-se de forma intermitente, e é tanto menor o espaçamento entre os pontos soldados, quanto menor for a velocidade dos roletes e maior a cedência de impulsos (Silva, 2016).

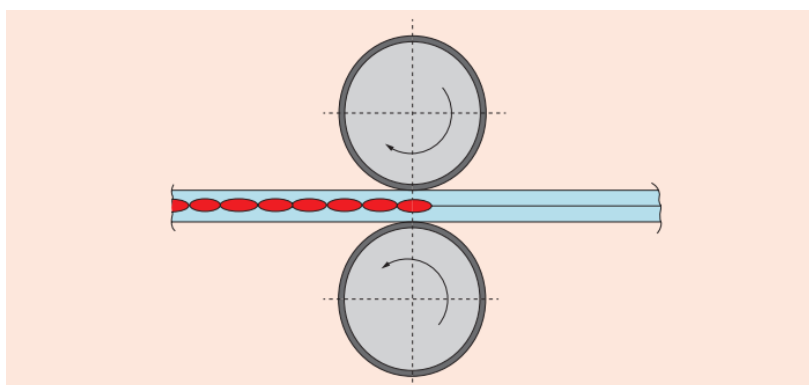


Figura 17 - Representação esquemática da soldadura por roletes (Retirado de: Silva, 2016)

A soldadura por projeção (Figura 18), utiliza peças previamente deformadas por enformação plástica, para que se estabeleça, de forma concisa, o ponto de contacto entre peças. Em comparação com a soldadura por pontos, apresenta um ponto de soldadura bastante mais estético, praticamente delimitado à depressão criada pela bossa (Silva, 2016).

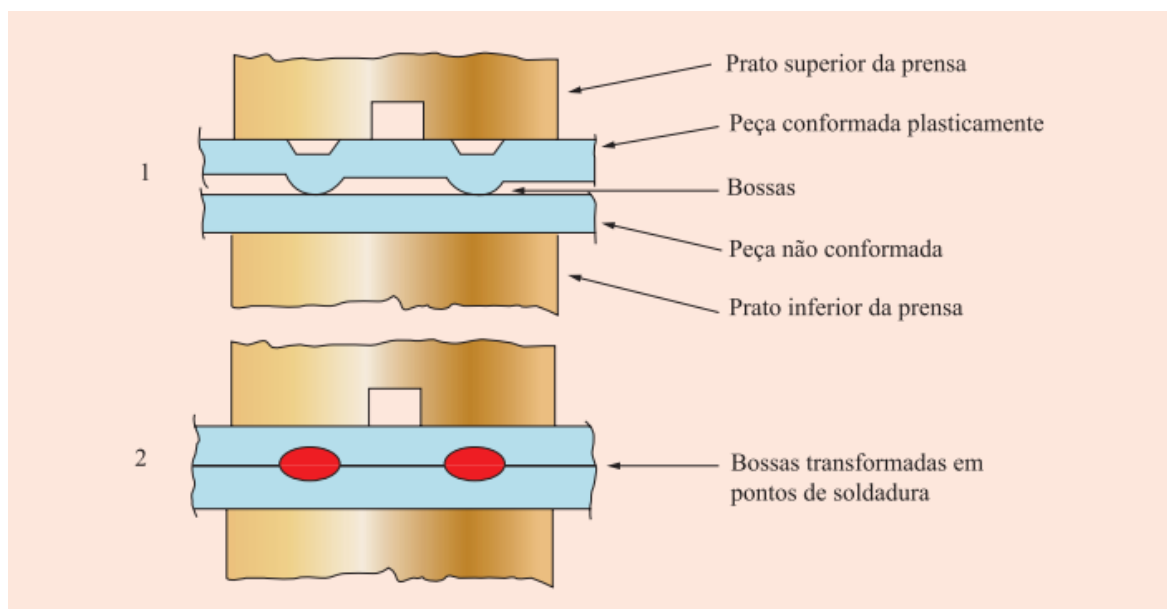


Figura 18 - Princípio de soldadura por projeção (Retirado de: Silva, 2016)

### Parâmetros

O processo de soldadura por resistência baseia-se na geração de calor pela passagem de corrente elétrica por efeito de Joule. Por isso, o processo depende principalmente dos fatores que estão presentes na expressão que descreve essa lei. Estes fatores são a resistência elétrica, intensidade de corrente aplicada e o tempo de passagem da corrente elétrica. No entanto, fatores como a força de aperto, material, forma e estado dos elétrodos, estado superficial e composição química do material a soldar, também possuem influência no resultado da soldadura. O calor libertado no metal base e o volume do ponto de soldadura são fortemente influenciados pela intensidade de corrente, daí se tratar de um parâmetro bastante importante no processo. A intensidade da corrente deve ser ajustada tendo em conta a condutividade térmica do material a ligar (Figura 19) (Silva, 2016).

| Material  | Densidade de Corrente necessária |
|-----------|----------------------------------|
| Aço Macio | 70 – 80 A/mm <sup>2</sup>        |
| Alumínio  | 150 – 200 A/mm <sup>2</sup>      |
| Cobre     | 250 – 300 A/mm <sup>2</sup>      |

Figura 19 – Densidade de corrente necessária para diferentes materiais, na soldadura por resistência/pontos (Retirado de: Silva, 2016)

### 2.3.3. Automação na soldadura

Em métodos tradicionais de soldadura, estima-se que 70 a 80% do custo total do processo de soldadura esteja relacionado com o elemento de trabalho do operador. A automação da soldadura é, portanto, um meio de reduzir os custos de operação, ao substituir o esforço manual por um sistema mecanizado. A maioria dos processos de soldadura são perigosos para o operador, e geram fumos, gases tóxicos, ruído e radiação eletromagnética. A aplicação da automação, não só reduz os custos de mão de obra, como elimina a exposição dos técnicos e todo o investimento nos equipamentos de proteção. Também, a capacidade de reproduzir a mesma soldadura inúmeras vezes é bastante inferior no caso da soldadura manual, especialmente em combinações de materiais e juntas complexas. O aumento do grau de automação aumenta substancialmente a consistência, reduzindo custos de inspeção e rejeição (Norrish, 2006).

Vários graus de automação podem ser aplicados, desde posicionadores simples até sistemas completamente integrados. Estes graus podem ser divididos da seguinte forma:

- Mecanização simples;
- Automação dedicada/uso único;
- Soldadura robotizada;
- Automação modular;
- Controlo programável.

A **mecanização simples** pode dividir-se entre tratores e posicionadores. Nesta primeira, são aplicados tratores elétricos guiados numa pista, e nestes é montada a tocha de soldadura. São utilizados normalmente para cordões de soldadura lineares. Já os posicionadores, são usados para facilitar o manuseamento das peças (Norrish, 2006).

**Sistemas de automação dedicados** são criados para uma aplicação em particular, e o equipamento resultante pode não ser adaptável. Este tipo de aplicação só é justificável para grandes volumes de produção. Tradicionalmente, estes sistemas são aplicados em componentes automóveis como pneus e sistemas de escapes, utilizando vários tipos de soldadura. Os **sistemas de automação de uso único** também são desenvolvidos para realizar a mesma junta de soldadura numa variedade de tamanhos de um dado componente (Norrish, 2006).

A **soldadura robotizada** utiliza um dispositivo programável, denominado de *robot*, para efetuar o processo de soldadura. Este *robot* possui um braço mecânico ou sistemas de manipulação, um sistema de soldadura e um sistema de controlo. A Figura 20 apresenta configurações/células de *robots* de soldadura típicas, sendo o braço articulado o mais utilizado na indústria, devido à sua flexibilidade e facilidade de chegar a áreas de acesso difícil, usando seis ou mais eixos de movimento (Norrish, 2006).

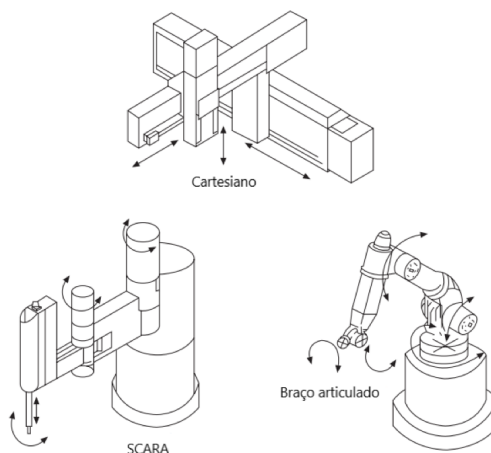


Figura 20 - Configurações típicas de *robots* de soldadura (Adaptado de: Norrish, 2006)

Posteriormente, foram desenvolvidos **sistemas de automação modulares**. Estes são compostos por componentes mecânicos comuns, que podem ser montados para servir uma determinada aplicação. Os módulos consistem em vigas de suporte, guias, unidades lineares e de rotação, suportes de tochas e sistemas de controlo. Usando esta abordagem, são conseguidas vantagens como simplicidade, baixo custo e rápido *design* dos sistemas. As capacidades dos sistemas podem ser estendidas usando um **controlo programável**, que permite o controlo da posição, do processo de soldadura e da gestão da célula (Norrish, 2006).

O investimento numa célula robotizada de soldadura MAG é económico, se for considerado um caudal produtivo de entre 1000 e 60 000 mil unidades por ano. Se a produção se aproximar deste limite superior, deve-se investir num *robot* maior ou mais sofisticado, que possa soldar vários componentes ao mesmo tempo (Weman, 2012).

Os benefícios da soldadura robotizada são:

- Maior produtividade – velocidades de soldadura geralmente superiores. Um *robot* em conjunto com um operador pode substituir 2-4 soldadores manuais;
- Qualidade do cordão de soldadura mais consistente e geralmente superior;
- Melhoria das condições de trabalho, sendo que o operador não precisa de estar exposto ao processo;
- A organização e controlo das atividades da periferia, ao introduzir o *robot*, têm benefícios na eficiência global.

Por outro lado, algumas desvantagens podem ser referidas, tais como a necessidade de formação substancial em termos de programação e serviço, as peças devem ter tolerâncias mais apertadas e as peças, provavelmente, necessitarão de um *redesign* para que sejam adequadas para soldadura robotizada (Weman, 2012).

#### 2.3.4. Comparação entre processos de soldadura

Na Tabela 10 são comparados os processos de soldadura referidos, comparando todos os aspetos relevantes.

Tabela 10 - Comparação das propriedades entre processos de soldadura (Swift &amp; Booker, 2003) (Castro, 2011) (Kalpakjian et al., 2009)

| Propriedades do processo | Soldadura MAG                                                                                                                                                                           | Soldadura a laser                                                                                                                                                                                   | Soldadura Resistência                                                                                                                                             |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de processo         | Semiautomático ou automático                                                                                                                                                            | Semiautomático ou Automático                                                                                                                                                                        | Manual ou automático                                                                                                                                              |
| Velocidade de soldadura  | 0,2 m/minuto em manual<br>15 m/minuto em automático                                                                                                                                     | 2,5 m/min a 80 m/min                                                                                                                                                                                | Pontos: 20 pontos/min<br>Roletes: 30 m/min                                                                                                                        |
| Formação do operador     | Média                                                                                                                                                                                   | Média                                                                                                                                                                                               | Não necessária                                                                                                                                                    |
| Quantidade de produção   | Alta                                                                                                                                                                                    | Moderada                                                                                                                                                                                            | Alta                                                                                                                                                              |
| Custo da mão de obra     | Médio a alto                                                                                                                                                                            | Médio                                                                                                                                                                                               | Baixo                                                                                                                                                             |
| Custo do equipamento     | Baixo a moderado<br>(caso seja manual ou automático)                                                                                                                                    | Alto                                                                                                                                                                                                | Baixo a moderado                                                                                                                                                  |
| Custo das ferramentas    | Baixo a moderado                                                                                                                                                                        | Muito alto                                                                                                                                                                                          | Baixo a moderado                                                                                                                                                  |
| Materiais a ligar        | Aços ao carbono, de baixa liga e inoxidáveis, maioria dos metais não ferrosos, ligas refratárias, difícil em metais dissimilares                                                        | Depende principalmente das características óticas dos materiais. Usado tipicamente em aço ao carbono e inoxidável; Dificuldade em soldar ligas de alumínio e aço; Não é utilizado em ferro fundido. | Praticamente qualquer combinação, mas não recomendado para ferro fundido, metais com baixo ponto de fusão e aços de alto carbono; Usado em aços de baixo carbono. |
| Aspetos de design        | Todos os níveis de complexidade possíveis; Utilização em juntas topo a topo, sobreposta, em "T" e em ângulo; Excelente em soldadura vertical e ao teto; Espessura entre 0,5 mm e 80 mm. | Soldadura horizontal é a mais apropriada; Juntas topo a topo, sobreposta e em "T"; Espessuras entre 0,1 mm e 20 mm; Obrigatório contacto justo entre superfícies.                                   | Juntas topo a topo, sobrepostas e em ângulo; Espessuras entre 0,3 mm e 6 mm.                                                                                      |
| Aspetos de qualidade     | Boa qualidade do cordão de soldadura; cordão limpo e com baixa distorção; bom acabamento da superfície do cordão de soldadura com tolerâncias típicas de $\pm 0,5$ mm                   | Excelente aproveitamento do material; alta qualidade do cordão de soldadura, sem escória, e com distorção ou contração mínima                                                                       | Alta qualidade do cordão, com baixa distorção; acabamento da superfície entre médio a bom; tolerâncias entre $\pm 0,5$ e $\pm 1$ mm                               |

Tabela 10 - Comparação das propriedades entre processos de soldadura (Swift & Booker, 2003) (Castro, 2011) (Kalpakjian et al., 2009) (continuação)

| Propriedades do processo | Soldadura MAG                                                                                                                | Soldadura a laser                                                                                                                                                                                                     | Soldadura Resistência                                                                                  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aspetos gerais           | Económico, mesmo para baixo volume de produção; alta produtividade; escolhas do elétrodo e do gás dependem do material base. | Económico para produção média-alta; alto consumo de energia; alto grau de automação possível, equipamento permite efetuar vários processos diferentes como: corte, endurecimentos de superfície, maquinagem, furação. | Económico, mesmo para baixo volume de produção; automação para todas as variantes relativamente fácil; |

### 2.3.5. Enformação de chapas finas

Neste subcapítulo, são analisados os métodos de enformação de chapas finas mais apropriados para a fabricação de perfis complexos.

#### 2.3.5.1. Dobragem

Dobragem é um dos processos mais comuns de enformação industrial. Este processo parte de chapa, prato ou tubo, que é dobrados segundo um eixo, provocando deformação plástica, para se conseguir uma determinada secção ou forma, introduzindo rigidez à peça ao aumentar o seu momento de inércia, sem aumentar a massa (Kalpakjian et al., 2009).

A Figura 21 apresenta a nomenclatura dos vários parâmetros.

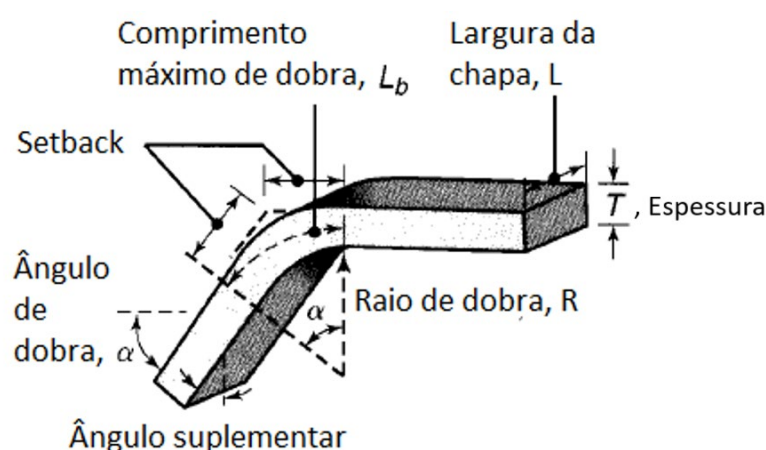


Figura 21 – Nomenclatura de dobragem (Adaptado de: Kalpakjian et al., 2009)

## Quinagem

Na enformação de chapas finas de grandes comprimentos, normalmente é utilizado o processo de quinagem. O equipamento (quinadora) utiliza moldes compridos, usando uma prensa hidráulica ou mecânica para dobrar a chapa de forma simples, com movimento ascendente ou descendente. Este processo de fabrico é adequado para baixa produção, mas pode ser automatizado para obter uma solução mais eficiente em relação ao custo, tornando-o viável para alta produção. Possui, também, uma alta adaptabilidade para fabricar grande variedade de formas (Kalpakjian et al., 2009). Os punções e os moldes são elementos relativamente simples, mas o seu *design* permite até a produção de peças complexas ao realizar vários dobragens (Beddies & Bibby, 1999).

A Figura 22 apresenta um esquema ilustrado de uma quinadora.

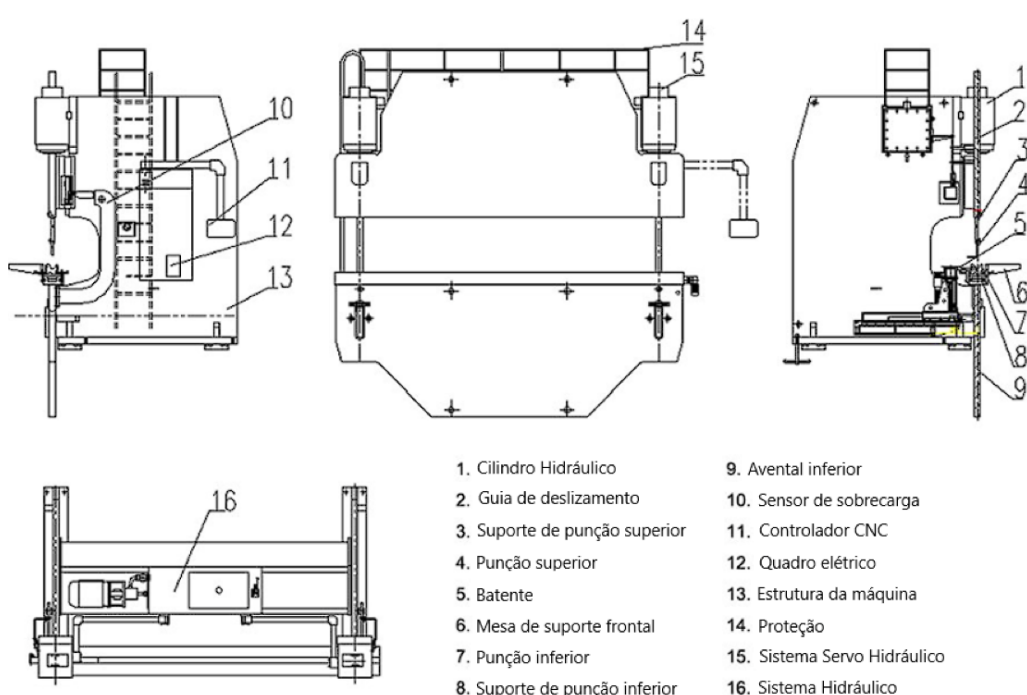


Figura 22 - Esquema ilustrativo de uma quinadora (Adaptado de: ADH, 2023)

Para conceber as ferramentas necessárias para formar uma dada forma, é necessário conhecer os seguintes parâmetros: raio mínimo de dobragem, ângulo de retorno elástico e a força de dobragem (Beddies & Bibby, 1999).

## Retorno elástico

Todos os materiais possuem um módulo de elasticidade finito, e este define o quanto o material se pode deformar sem gerar deformação permanente, plástica. No entanto, no processo de dobragem de uma chapa fina, arame ou até mesmo de uma secção tubular, verifica-se algum retorno da deformação elástica. Este fenómeno diminui o ângulo e aumenta o raio de dobragem final. Por norma, este fenómeno é eliminado dobrando a peça em questão com um ângulo maior do que se quer como resultado da dobragem. Este ângulo extra é comumente obtido após tentativa e erro.

Outra técnica para reduzir o retorno elástico é a aplicação de tensões compressivas no local da dobra (Kalpakjian et al., 2009).

O retorno elástico pode ser calculado aproximadamente como uma relação entre o raio de dobra e o raio após retorno elástico (Kalpakjian et al., 2009).

$$\frac{R}{R_r} = 4 \left( \frac{R \cdot f_y}{T \cdot E} \right)^3 - 3 \left( \frac{R \cdot f_y}{T \cdot E} \right) + 1 \quad (5)$$

Sendo  $R_r$  o raio após retorno elástico,  $R$  o raio de dobra,  $f_y$  a tensão de cedência do material,  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $T$  a espessura da chapa.

### Raio mínimo de dobra

Durante o processo de dobra, a face exterior da chapa encontra-se à tração e a interior à compressão. O raio mínimo de dobra,  $R_m$ , é limitado pela tensão instalada na face exterior e é definido como o raio para o qual é visível a primeira fissuração na chapa (Kalpakjian et al., 2009). A equação 6 apresenta a fórmula utilizada para calcular este valor.

$$R_m = T \left( \frac{50}{r} - 1 \right) \quad (6)$$

Sendo  $r$  a redução de área da secção quando sujeito a um ensaio de tração (%).

Por exemplo, para valores de  $r = 50\%$ , o valor mínimo de dobra,  $R_m$ , é 0, e é possível dobrar a chapa a  $180^\circ$  (*hemming*). O valor de  $r$  pode ser aumentado ao aquecer o material ou dobrar a alta pressão, aumentando a capacidade de o material ser dobrado, ou seja, incrementar a dobrabilidade. Outras variáveis que alteram a dobrabilidade são as condições de rugosidade das faces, as propriedades das inclusões e a anisotropia da chapa (Kalpakjian et al., 2009).

### Força de dobra

A força de dobra é o valor de força para o qual a dobra é conseguida. Este valor é obtido por aproximação da chapa a uma secção retangular, e calculado pela teoria de vigas simples (Beddies & Bibby, 1999).

#### 2.3.5.2. Perfilagem

Perfilagem é um método de enformação contínuo, que se dá entre um conjunto de rolos rotativos. A forma ou altura dos rolos é modificada incrementalmente e, quando a chapa fina de espessura constante passa em cada uma destas séries, esta é dobrada em fases consecutivas para produzir a secção desejada (Swift & Booker, 2003, Kalpakjian et al., 2009).

Este processo é apropriado para grandes séries, dado que a instalação dos rolos é dispendiosa devido ao grande número de passagens e, no final da enformação, os perfis conseguidos são cortados em comprimentos específicos e empilhados. O método de fabrico impõe uma pressão

elevada ao material, provocando deformação plástica e pode ser realizada a alta temperatura se o material o requerer, como é o caso do titânio, magnésio, níquel, crómio e suas ligas. Obtém também velocidades de processamento bastante elevadas (até 260 m/min) (Swift & Booker, 2003, Kalpakjian *et al.*, 2009, Halmo, 2006, Tekkaya & Altan, 2012).

Na Figura 23 é possível observar um esquema do processo. A perfilagem permite processar materiais como aço, aço inoxidável, alumínio, cobre e latão, com espessura entre 0,025 mm e 25 mm, podendo apresentar tolerâncias de 0,01 mm com um cuidadoso processo de *design* dos rolos (Tekkaya & Altan, 2012).

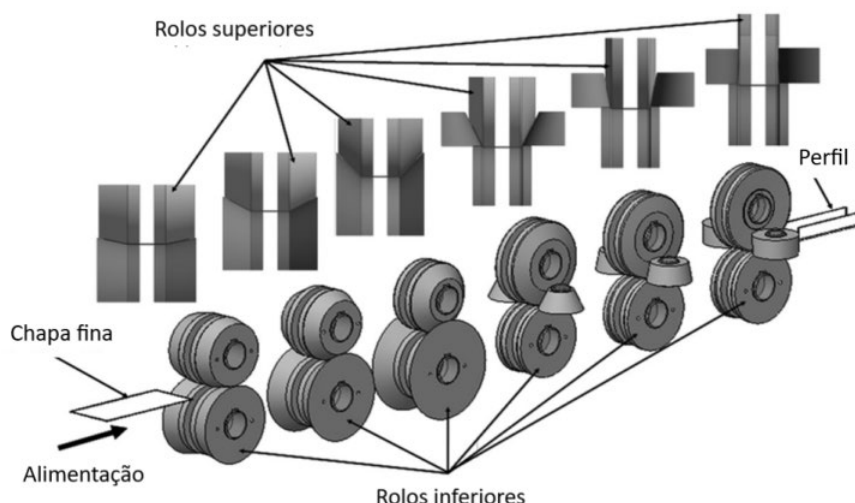


Figura 23 - Esquema ilustrativo do processo de perfilagem (Adaptado de: Tekkaya & Altan, 2012)

Como o processo apresenta um cariz de etapas graduais de enformação, materiais que por norma não são apropriados para operações de dobragem, como ligas de baixa ductilidade, podem ser conformados por este processo. A perfilagem é um método de fabrico bastante flexível, podendo, também, conformar metais dissimilares e compósitos. Em conjunto com a grande variedade de geometrias que podem ser produzidas (Figura 24) e o alto caudal produtivo, o processo de perfilagem é usado em várias aplicações como: automóveis, partes para alfaia e aeronaves, navios, painéis para estruturas e armazéns, mobiliário e tubos (Tekkaya & Altan, 2012).

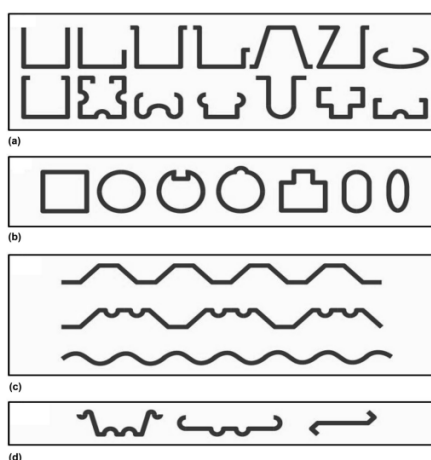


Figura 24 - Exemplos de produtos que podem ser perfilados: a) secção aberta, b) secção fechada, c) perfil comprido, d) perfil curto (Retirado de: Tekkaya & Altan, 2012)

### Base de instalação

A base de instalação é o componente que suporta todas as ferramentas que fabricam o produto e ainda fornece a potência de operação. Toda a linha de perfilagem é alinhada pelos ombros do veio da base (Figura 26). Os tipos de base podem ser os mais variados, e podem ser classificados como unilateral, dupla, dupla com eixo estendido, convencional, com pratos, entre outras.

Na Figura 25 é possível observar a secção de corte de uma base **unilateral**.

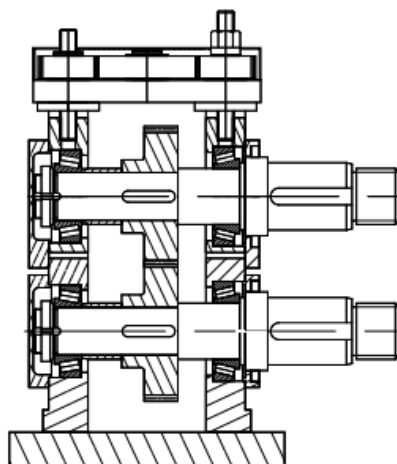


Figura 25 - Secção de corte de uma base unilateral (Retirado de: Halmo, 2006)

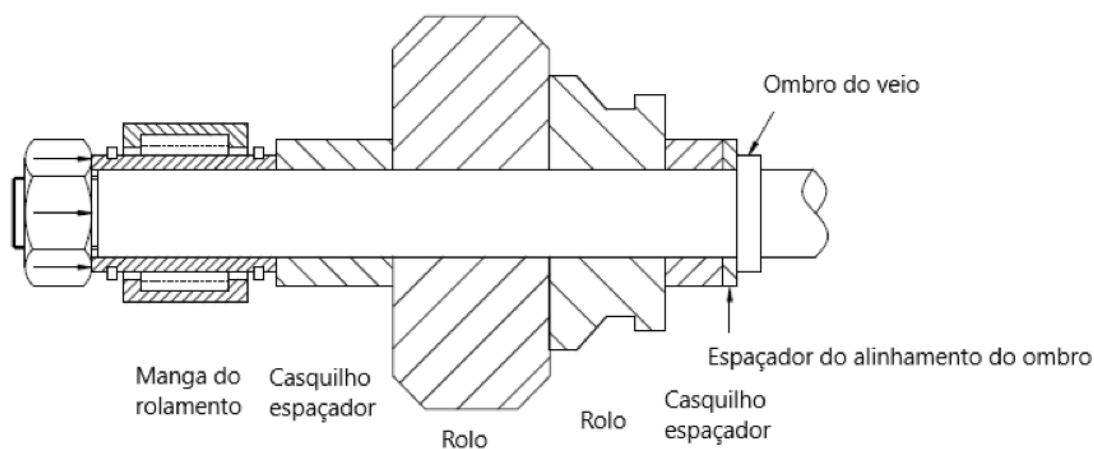


Figura 26 - Legenda de um veio de uma perfiladora (Adaptado de: Halmo, 2006)

A base unilateral é simples, requer poucos ajustes e tem um baixo custo relativo. Os eixos encontram-se fixos em apenas um dos lados e, portanto, a deformação nos eixos é quatro vezes maior do que se fossem duplamente apoiados. Logo, o comprimento dos eixos quando a base é unilateral é limitado. No entanto, a deformação pode ser diminuída aumentando o diâmetro dos eixos. A base unilateral muito raramente conforma chapas com mais de 100 mm de largura (Halmo, 2006).

A base **dupla** é a combinação de duas bases unilaterais, em que uma delas ou ambas podem ser ajustáveis. Podem conformar chapas mais estreitas, cujo valor mínimo depende do quão próximo as linhas podem ser ajustáveis. O valor máximo, da mesma forma que nas bases unilaterais, não

ultrapassa os 100 mm de largura. Na maioria dos casos, no entanto, esta configuração permite uma maior variedade de produtos (Halmo, 2006).

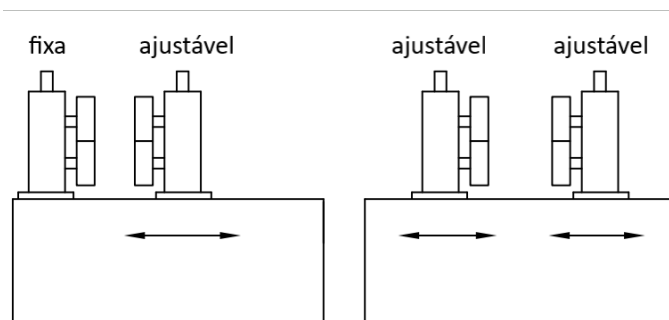


Figura 27 – Esquema de uma base dupla com uma ou duas bases ajustáveis (Adaptado de: Halmo, 2006)

Na base **convencional**, o eixo é apoiado em ambas as extremidades, como é visível na Figura 28.

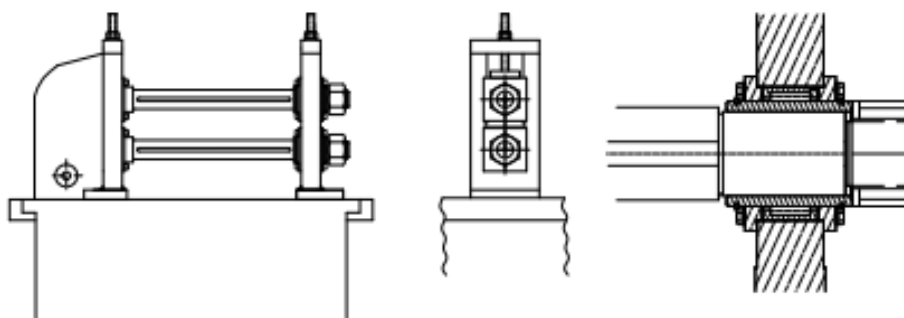


Figura 28 - Esquema de uma base convencional (Retirado de: Halmo, 2006)

Nesta configuração, qualquer largura ou espessura de material pode ser conformado, daí a sua popularidade dentro deste método de fabrico. A bancada do lado da transmissão, fixa os eixos e acomoda a transmissão, enquanto a bancada do lado do operador suporta a outra ponta. As bancadas podem ser retiradas para facilitar a troca dos rolos (Halmo, 2006).

A base **com prato**, utiliza um suporte, onde está situada a transmissão e onde os pratos são colocados. Cada prato tem 4, 8 ou mais bancadas, e este número é restrito pela capacidade de carga das pontes rolantes na fábrica. Todas as bancadas podem ser trabalhadas pelo operador. A transmissão possui um sistema de ligar/desligar tipo embraiagem, e apenas os eixos inferiores estão diretamente fixos à transmissão, enquanto os eixos superiores são rodados através de engrenagens. Esta configuração permitiu uma redução drástica na mudança dos rolos, de cerca de 8 horas para cerca de 30/45 minutos, ou até mesmo 5 minutos (Halmo, 2006).

### Processo de *design* dos rolos

O objetivo da etapa de *design* passa por obter o produto requerido com as especificações impostas, utilizando o menor número de passagens possível. No entanto, se foram consideradas passagens a menos, o perfil final aparecerá deformado. A secção transversal do produto final é o fator mais importante neste processo, e são consideradas ilimitadas a quantidade de formas que são possíveis

de se produzir. Também, quanto maior for a profundidade da secção, máxima distância na vertical do produto final, maior número de passagens serão requeridas.

Para além da simulação numérica, não existe nenhuma fórmula ou método que calcule o número de passagens, portanto, aceita-se que um especialista consegue chegar a um número certo de passagens através da experiência adquirida. Uma vez definido o número de passagens, a sequência e quantidade de enformação, é realizado um diagrama de flor que mostra a secção do perfil em cada passagem (Halmo, 2006). Este diagrama é apresentado na Figura 29.

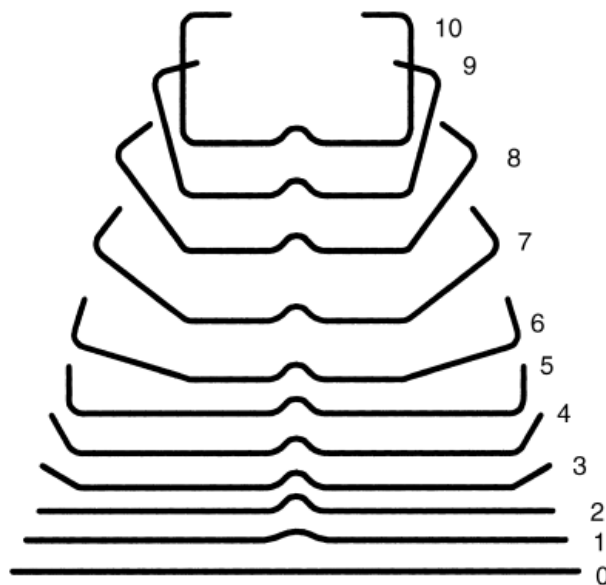


Figura 29 – Diagrama de flor (Retirado de: Halmo, 2006)

A utilização de grandes saliências no *design* da secção, tem como principal objetivo o aumento da rigidez da secção. Estas perfis podem ser *formed* ou *grooved*. Neste primeiro caso, a largura da chapa diminui, sendo necessário começar por uma chapa mais larga, para que o produto final esteja dentro do pretendido. No caso de perfis *grooved*, as saliências reduzem a espessura do material adjacente e não é necessário material adicional. No entanto, este último caso gera tensões mais elevadas.

A largura da chapa a ser conformada normalmente não influencia o número de passagens, contudo, na enformação de chapas largas (até 635 mm) com baixa espessura, é recomendado que se comece pelo centro, e de seguida as laterais começam a ser dobradas no mesmo plano relativo ao centro, e cada vez mais perto deste, como mostra a Figura 30.

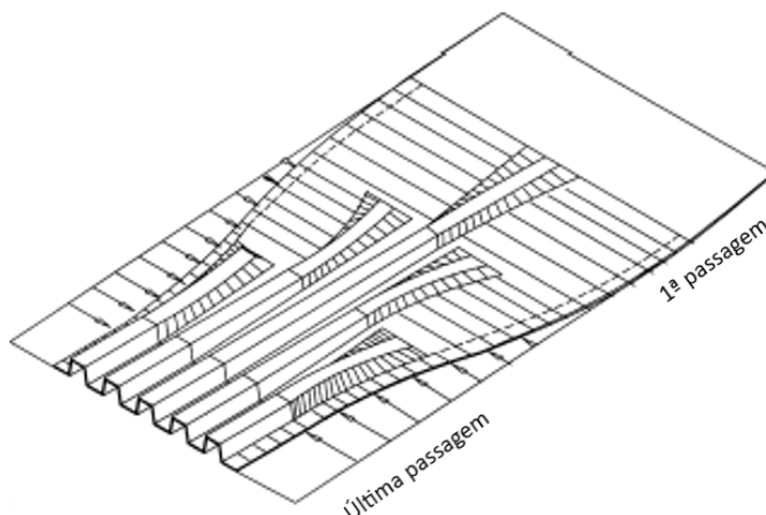


Figura 30 - Enformação por rolagem de um painel (Retirado de: Halmo, 2006)

A chapa fina deve ser dobrada com um raio pequeno, entre 1 a 2 vezes a espessura do material. Desta forma, o material atinge deformação permanente e tem um retorno elástico bastante pequeno. O valor de raio mínimo possível para dobrar é especificado pelo fabricante do material. Também será minimizado o retorno elástico, caso se mantenha o raio para todo o perfil.

#### 2.4. *Design* assistido por computador e método dos elementos finitos

O uso de computadores para assistir no desenvolvimento, modificação, estudo ou otimização de um *design*, é dado como desenho assistido a computador (CAD do inglês computer-aided design). Anteriormente, os projetistas realizavam os desenhos de forma manual. A modificação do *design* implicava que o desenho fosse feito de novo para cada alteração. No entanto, com a introdução dos sistemas CAD, é possível a modificação rápida do projeto quando necessário, reduzindo custos de desenvolvimento e o tempo de conclusão de um projeto. Também permite fácil visualização do produto e identificação de erros do *design* e, desta forma, o produto é iterado até chegar à sua forma final. Os sistemas CAD possibilitam o desenvolvimento de um modelo 3D, permitindo a visualização do produto de vários ângulos. É possível, também, efetuar a montagem entre vários componentes, criando um modelo de montagem que pode ser de igual forma iterado, para que todos os elementos sejam ligados da melhor forma (Shivegowda *et al*, 2022).

O *software* CAD tem excelente capacidade de documentação, pelo que todos os comprimentos, ângulos e medições serão armazenados para referência futura e, uma vez que o desenho é normalizado, são facilmente lidos (Shivegowda *et al*, 2022). As dimensões do modelo são indicadas sob a forma de vistas em 2D, visíveis na Figura 31.



### 3. CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO E DO PROBLEMA

Este capítulo aborda a primeira parte da primeira etapa da metodologia DSR, no qual foi definido o estado de arte do produto, do processo e da empresa, assim como a identificação do problema.

#### 3.1. Caracterização da Empresa

A Herculano Alfaias Agrícolas S.A., nasce em 1969 na zona industrial de Loureiro, Oliveira de Azeméis. A sua origem remonta a uma pequena oficina onde a família Lopes começou a fabricar pequenos utensílios agrícolas. Aos poucos, a oficina foi crescendo, para acompanhar a modernização e exigência do mercado. Em 1969 produz o seu primeiro reboque agrícola que deu origem ao principal produto vendido pela empresa. Em 1982 surge a primeira exportação, e é em 1986 que a Herculano é oficialmente reconhecida como líder na fabricação e comercialização de semirreboques agrícolas, assumindo esta posição a nível nacional até aos dias de hoje.

Em Maio de 1997 é adquirida pelo Grupo Ferpinta S.G.P.S., S.A. com uma cota de 80% da empresa, trazendo consigo uma nova dinâmica financeira e estratégica. Mais tarde, em Dezembro de 2005, a FERPINTA S.G.P.S., S.A., e a família Teixeira (detentora do grupo Ferpinta), passaram a deter 100% do capital da empresa. Devido às parcerias com o Grupo Ferpinta, a Herculano – Alfaias Agrícolas S.A. aumentou a sua exportação e, atualmente, está presente em diversos mercados, tais como: Angola, Senegal, Moçambique, Austrália, Nova Zelândia, Canadá, Espanha, França, Bélgica, entre outros. O *know-how* reconhecido da empresa permite parcerias com marcas mundialmente reconhecidas, como é o caso da *John Deere*. No passado, foram fabricados equipamentos e máquinas para outras marcas líderes, tais como a *Terex-PPM*, *Liebherr* e *Sercel*.

A Empresa é, no presente, um dos maiores fabricantes ibéricos de material agrícola. Possui área de cerca de 48.000 m<sup>2</sup> e 176 colaboradores, e apresentou no ano de 2022 uma faturação de 16.303.188,99 €.

#### 3.2. Caracterização do produto

O projeto teve como base o semirreboque S1ET 3x1,6 (comprimento x largura, em metros) (Figura 32), um dos semirreboques da Herculano que utiliza chapa perfilada. A Tabela 11 apresenta o nome técnico e a funcionalidade de todos os componentes mencionados.



Figura 32 - Semirreboque agrícola S1ET (Retirado de: Herculano, 2022)

Na Figura 33 é possível visualizar o perfil usado nesta gama de semirreboques, encomendado da Empresa *profilcar* para a conceção dos taipais, que constituem as laterais, frente e retaguarda da caixa.

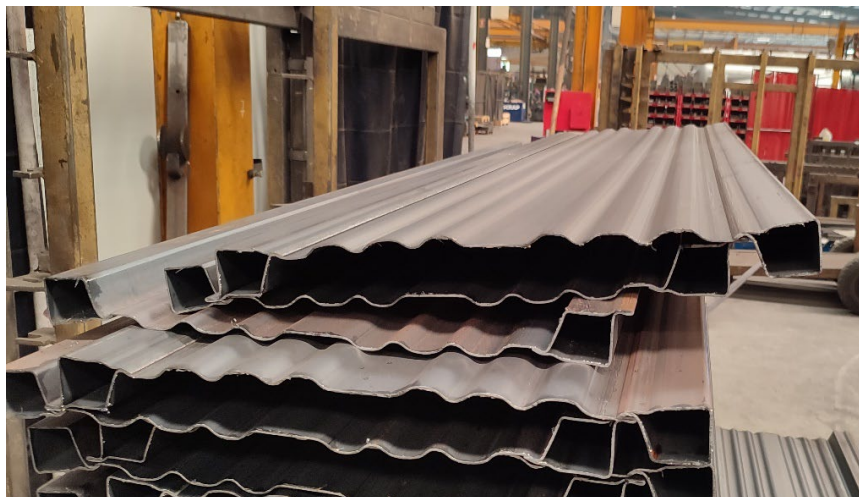


Figura 33 - Perfil italiano utilizado

A Herculano fabrica vários tipos de semirreboques e, dentro da mesma gama, possuem tamanhos e capacidade de carga diferentes, pelo que o perfil pode vir cortado pelo fabricante, ou é cortado na Empresa. A caixa de carga é essencialmente composta pelos conjuntos de taipais laterais, traseiros e frontais, e pelas colunas. Dentro da gama dos semirreboques S1ET, existe uma grande variedade de opções no que diz respeito à capacidade de carga, tamanho e, consequentemente, nos componentes que são montados. Os taipais podem montar diretamente no chassis e outros, chamados de taipais suplementares, são montados em cima deste, de forma opcional. Nestes, são montados diferentes acessórios. Vários componentes utilizados são fabricados na Herculano, enquanto outros são comprados.

### 3.2.1. Taipal traseiro

Na Figura 34 é possível visualizar parte do taipal traseiro. A chapa perfilada traseira (1) é ligada ao *chassis* em três pontos: é fixa à coluna pelo componente (5), fixa ao *chassis* pela dobradiça (3) e é montada, naturalmente, em cima do *chassis*. De notar a barra na parte inferior da coluna (2), que permite que esta monte nas orelhas do *chassis*.

O taipal traseiro é a parte da caixa de carga mais complexa, porque pode rodar em torno do seu eixo superior ou inferior. Na Figura 35 são demonstradas as duas situações: destrancando o fecho (5), o taipal roda sobre a dobradiça traseira (3). O taipal traseiro é aberto desta forma, normalmente, em situações de carregamento. No entanto, em situações de descarga (Figura 35, lado direito), ao vasculhar a caixa à retaguarda, através do hidráulico, o taipal encosta no solo antes de se conseguir o ângulo total de basculamento, 45° para a retaguarda e para a lateral, obtendo uma descarga lenta e ineficiente.

Ao desacoplar a dobradiça inferior usando o componente (4), o taipal pode rodar em torno do eixo do componente (5). Nesta situação (Figura 35, lado esquerdo), é permitido o basculamento completo à retaguarda e a descarga é mais eficiente.

O fueiro (6), é um componente que permite que o cliente monte vigas de madeira para garantir fixação extra da carga. A pega (7) facilita a abertura do taipal. A chapa (8) apoia a montagem da dobradiça e a chapa (9) apoia a montagem do fecho, permitindo a fixação do taipal principal ao taipal suplementar.

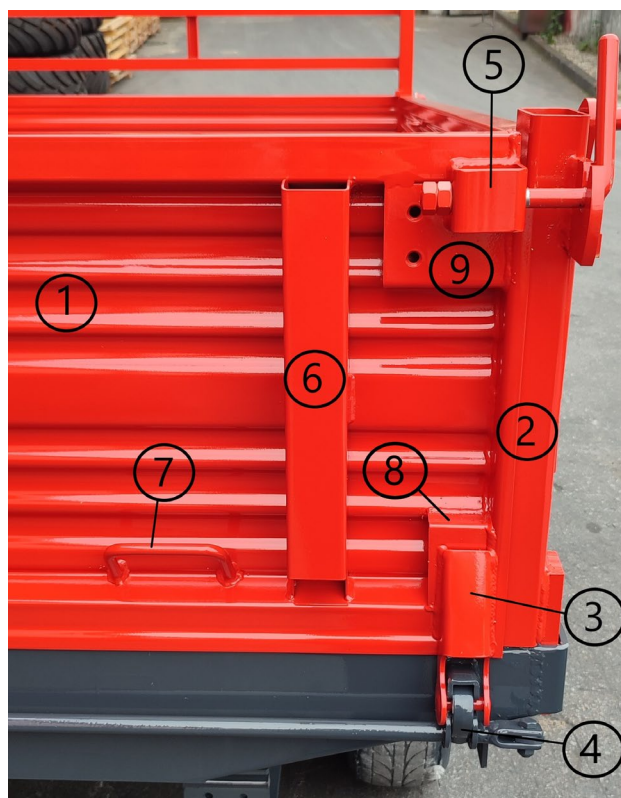


Figura 34 - Vista aproximada do canto direito do taipal traseiro

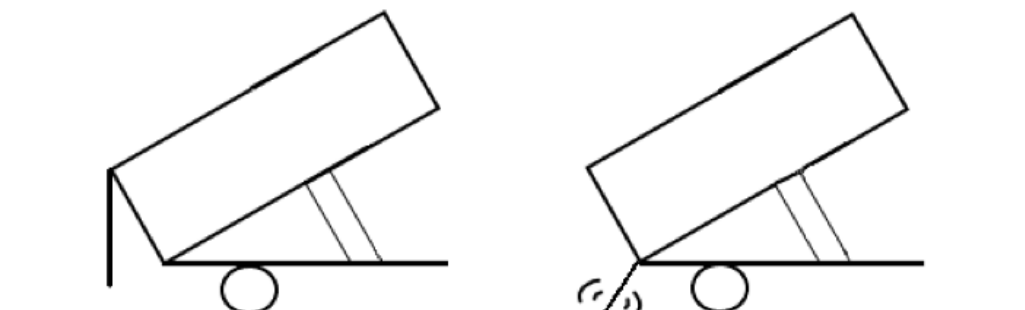


Figura 35 – Representação esquemática das possíveis situações de descarga traseira

### 3.2.2. Taipal lateral

Nos taipais laterais, a Herculano apenas permite a rotação do taipal pelo seu eixo inferior, pelo que aplica uma dobradiça diferente (11), visível na Figura 36. Os fueiros (6), para modelos com maiores dimensões, são substituídos por travessas (14) que oferecem maior rigidez ao taipal.

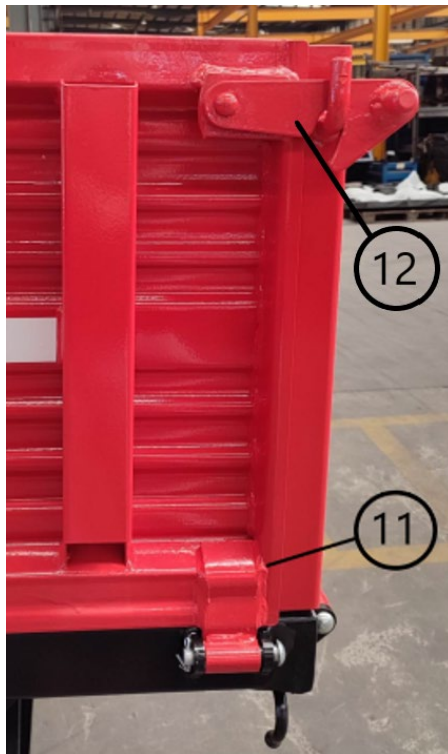


Figura 36 – Vista aproximada do taipal lateral

É aplicada uma corrente (15) ajustável, visível na Figura 37, na parte interior dos taipais laterais, a qual permite fixação da carga, mas principalmente impede grandes deformações dos taipais laterais, assim como contribui para a diminuição dos esforços.



Figura 37 – Corrente

### 3.2.3. Taipal frontal

O taipal frontal (Figura 38) é o mais simples, montando no *chassis* através das duas colunas (2) e uma chapa a meio vão. De notar que este taipal não possui qualquer possibilidade de rotação, pelo que se situa no lado do trator, e essa funcionalidade não tem qualquer interesse. Em termos de construção, portanto, o taipal forma um conjunto completo com as colunas. O malhal (16), é montado no taipal frontal e tem como objetivo facilitar a fixação de cargas, assim como garantir uma maior segurança do trator em caso de deslocamento da carga proveniente da travagem.



Figura 38 - Taipal frontal

Os taipais suplementares são montados em cima dos taipais principais e têm como objetivo o aumento da capacidade volúmica de carga. Esta montagem é conseguida através da extensão das colunas, que é visível na Figura 39.



Figura 39 – Coluna

Tabela 11 – Nome técnico e funcionalidade de cada componente dos taipais

| <b>Legenda</b> | <b>Nome técnico</b>                    | <b>Funcionalidade</b>                                  |
|----------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>(1)</b>     | Chapa perfilada frontal/traseira       | Suporte de carga                                       |
| <b>(2)</b>     | Coluna traseira                        | Suporte montagem                                       |
| <b>(3)</b>     | Dobradiça traseira                     | Rotação do taipal traseiro sob o eixo inferior         |
| <b>(4)</b>     | Sistema de desacoplamento da dobradiça | Desacoplamento do eixo inferior                        |
| <b>(5)</b>     | Fecho traseiro                         | Rotação do taipal traseiro sob eixo superior e fixação |
| <b>(6)</b>     | Fueiro                                 | Colocação de vigas de madeira para apoiar a carga      |
| <b>(7)</b>     | Pega                                   | Facilitar a abertura do taipal                         |
| <b>(8)</b>     | Apoio da dobradiça                     | Montagem da dobradiça                                  |
| <b>(9)</b>     | Chapa do taipal suplementar            | Montagem do fecho e fixação do taipal suplementar      |
| <b>(10)</b>    | Chapa perfilada lateral                | Suporte de carga                                       |
| <b>(11)</b>    | Dobradiça lateral                      | Rotação do taipal lateral                              |
| <b>(12)</b>    | Fecho lateral                          | Bloqueio do taipal lateral                             |
| <b>(13)</b>    | Gancho                                 | Fixação do fecho                                       |
| <b>(14)</b>    | Travessa                               | Reforço do taipal                                      |
| <b>(15)</b>    | Corrente                               | Redução das cargas                                     |
| <b>(16)</b>    | Malhal                                 | Apoio de carga e proteção do trator                    |
| <b>(17)</b>    | Taipal Suplementar                     | Aumento do volume de carga transportável               |

### 3.3. Caracterização do processo

#### 3.3.1. Caracterização do processo de soldadura

O método de ligação utilizado é soldadura MAG. A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros utilizados na empresa. O material de adição utilizado está caracterizado na Figura 40.

Tabela 12 – Principais parâmetros utilizados no processo de soldadura

| <b>Parâmetro/Componente</b>  | <b>Fecho</b> | <b>Fueiro</b> | <b>Dobradiça traseira</b> |
|------------------------------|--------------|---------------|---------------------------|
| Espessura do componente (mm) | 8            | 2             | 5                         |
| Diâmetro do fio (mm)         | 1            | 1             | 1                         |
| Intensidade de corrente (A)  | 144-146      | 90-94         | 150-158                   |
| Diferença de potencial (V)   | 23-24        | 21-22,5       | 25-27                     |

Tabela 12 - Principais parâmetros utilizados no processo de soldadura (continuação)

| Parâmetro/Componente                     | Fecho                                    | Fueiro | Dobradiça traseira |
|------------------------------------------|------------------------------------------|--------|--------------------|
| Velocidade de alimentação do fio (m/min) | 6,25                                     | 4,5    | 7,75               |
| Fluxo de gás (L/min)                     | 16-18                                    |        |                    |
| Material de adição                       | EUROTROD M/SG 2                          |        |                    |
| Gás de proteção                          | SANARC 15 – 85% CO <sub>2</sub> e 15% Ar |        |                    |

| EUROTROD<br>AWS /ASME<br>EN ISO | Características mecânicas<br><i>Características mecânicas</i> |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| M/SG 2                          | Re 420 N/mm <sup>2</sup>                                      |
| 5.18: ER 70 S-6                 | Rm 520 N/mm <sup>2</sup>                                      |
| 14341-A: G3 Si 1                | A5 > 30%                                                      |
|                                 | KV > 72 J (- 30° C)                                           |

Figura 40 – Designação e características mecânicas do material de adição (Retirado de: Electroportugal, 2023)

3.4. Caracterização do problema

A aplicação de robotização na soldadura do perfil com o topo (Figura 41) é dificultada pelos seguintes fatores: existência de um perfil ondulado pouco adequado, face de corte da chapa com alta rugosidade quando cortada no fornecedor e variação dimensional do perfil em comprimento. A utilização de automação na soldadura deveria induzir um aumento significativo na eficiência, mas que é impactado negativamente pela necessidade de reajustar o *robot*, marcando os pontos do curso do *robot* novamente.



Figura 41 - Identificação da soldadura entre o perfil e o topo

### 3.4.1. Análise da soldadura

Foram analisados alguns cordões de soldadura de acessórios que são soldados a *robot*. Segundo a norma BS EN ISO 6520-1:2007, foram identificados os defeitos nos cordões, e estes avaliados através da norma BS EN ISO 5817:2014.

Na Figura 42, pode visualizar-se uma foto do cordão de soldadura efetuado a *robot* num fecho lateral, que apresenta um poro à superfície, o qual pode ser associado à referência 2017 da norma ISO 6520-1:2007.



Figura 42 – Poro à superfície

Na Figura 43 é visível um defeito denominado de cratera no final do cordão, referência 2025.



Figura 43 - Cratera no final do cordão

O defeito presente na Figura 44 é um cordão de soldadura imperfeito, referência 500. O defeito de cordão de soldadura imperfeito, na norma, é subdividido em vários outros defeitos, que se podem manifestar de forma singular ou através de várias imperfeições no mesmo cordão.



Figura 44 - Forma do cordão imperfeita

A Figura 45 apresenta também um cordão imperfeito como defeito, em concreto, excessiva assimetria do comprimento da perna do filete, assim como alguma convexidade.



Figura 45 - Assimetria do cordão (à esquerda). Excesso de material (à direita)

A Figura 46 apresenta um defeito denominado de salpicos, referência 602.



Figura 46 – Salpicos

De seguida, foram verificadas as condições impostas pela norma BS EN ISO 5817:2014, considerando o nível de qualidade do tipo C. A primeira etapa passa pela definição das dimensões do cordão de soldadura.

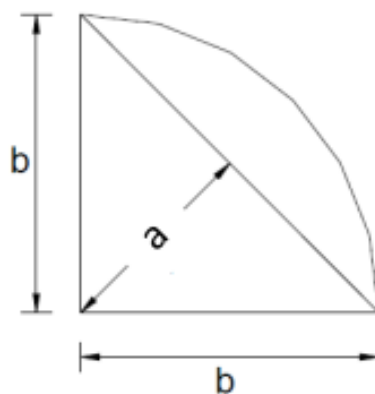


Figura 47 - Legenda da secção transversal do cordão de soldadura (Retirado de: Fonseca, 2022).

No desenho, é indicado o valor da garganta ( $a$  - Figura 47). O valor de  $a$  pode ser obtido a partir do valor de  $b$  da seguinte forma:

$$a = \cos 45^\circ b = 0,7 b \quad (7)$$

O valor da garganta indicado, deve respeitar a seguinte inequação, segundo EN 1993-1-3 (2010):

$$a < 0,7 * t \quad (8)$$

A norma EN 1993-1-8:2010 define também o valor de garganta mínimo, apenas aplicável para espessuras acima de 4 mm, e que é de 3 mm. O EN 1993-1-3:2006 define o valor da garganta para espessuras inferiores como igual à espessura do elemento a ligar.

Na Tabela 13 pode-se visualizar a análise realizada ao cordão de soldadura em três componentes soldados a *robot*, identificação dos defeitos mais recorrentes segundo a norma ISO 6520-1:1998, e a quantidade em que se manifestam, assim como o número de vezes que reprovaram à verificação segundo a BS EN ISO 5817:2014.

Tabela 13 - Identificação e verificação dos defeitos de soldadura

| Componente                                             | Defeitos mais recorrentes                     | Verificação   |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|
| Fecho<br>Amostra = 20 peças<br>Espessura = 8 mm        | Poro à superfície (7 identificados)           | 7 reprovados  |
|                                                        | Cratera no final do cordão (17 identificados) | 16 reprovados |
|                                                        | Convexidade excessiva (4 identificados)       | 0 reprovados  |
|                                                        | Assimetria excessiva (12 identificados)       | 7 reprovados  |
|                                                        | Mordedura (8 identificados)                   | 1 reprovados  |
|                                                        | Salpicos (10 identificados)                   | -             |
| Fueiro<br>Amostra = 20 peças<br>Espessura = 2 mm       | Cratera no final do cordão (8 identificados)  | 0 reprovados  |
|                                                        | Salpicos (9 identificados)                    | -             |
| Dobradiça traseira<br>Amostra = 20<br>Espessura = 5 mm | Cratera no final do cordão (20 identificados) | 0 reprovados  |
|                                                        |                                               |               |

A Tabela 14 apresenta os defeitos encontrados e as suas possíveis causas.

Tabela 14 - Defeitos identificados e possíveis causas (O'Brien, 2004) (Silva, 2014)

| Defeito    | Possíveis causas                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Porosidade | <ul style="list-style-type: none"> <li>Diferença de potencial excessiva;</li> <li>Velocidade de alimentação do fio excessiva;</li> <li>Fluxo de gás muito alto ou muito baixo;</li> <li>Existência de tintas, gorduras e corrosão na superfície da junta.</li> </ul> |

Tabela 14 - Defeitos identificados e possíveis causas (O'Brien, 2004) (Silva, 2014) (continuação)

| Defeito                           | Possíveis causas                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cratera no final do cordão        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Restrição excessiva no <i>gabarit</i>;</li> <li>• Ambiente de operação sujo;</li> <li>• Eléttodos defeituosos;</li> <li>• Diluição excessiva;</li> <li>• Tentativa de evitar a sobreposição do início e fim do cordão;</li> <li>• Falta de experiência do técnico.</li> </ul> |
| Convexidade excessiva             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de avanço demasiado lenta;</li> <li>• Intensidade de corrente demasiado elevada;</li> <li>• Preparação incorreta da junta.</li> </ul>                                                                                                                              |
| Assimetria do cordão de soldadura | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensidade de corrente demasiado elevada;</li> <li>• Posição incorreta da tocha.</li> </ul>                                                                                                                                                                                  |
| Salpicos                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrente de soldadura demasiado elevada;</li> <li>• Polaridade incorreta;</li> <li>• Consumível inadequado ou contaminado;</li> <li>• Arco demasiado longo ou instável;</li> <li>• Falta de limpeza da junta a soldar.</li> </ul>                                             |

Ao analisar o *gabarit* utilizado para o fabrico dos fechos, pode-se verificar que este é excessivamente restrito e causa dificuldades no processo de soldadura. Na Figura 48 é possível visualizar, assinalado a vermelho, uma zona onde a tocha entra em contacto com o *gabarit*, perturbando o seu percurso.

Figura 48 - Restrição identificada no *gabarit*

Na Figura 49, é possível verificar que o *robot* está a efetuar a solda do componentes no lado direito da superfície de trabalho quando poderia soldar com um posicionamento mais central, o que dificulta ainda mais o processo de soldadura. Também, é de notar que os defeitos identificados no fecho, são, também, fruto de falta de limpeza da junta.



Figura 49 - Robot de soldadura a trabalhar lateralmente



## 4. Análise da concorrência

### 4.1. Produtos concorrentes

Empresas como a Pronar e Fuhrmann, não só produzem semirreboques agrícolas, como fabricam os próprios perfis. Comparativamente à Herculano, na concorrência não se encontram perfis com grandes ondulações, observando-se uma tendência para perfis com linhas retas e com maiores saliências (Figura 50 - Perfil *Fuhrmann* (à esquerda) e Perfil *italiano* (à direita)).

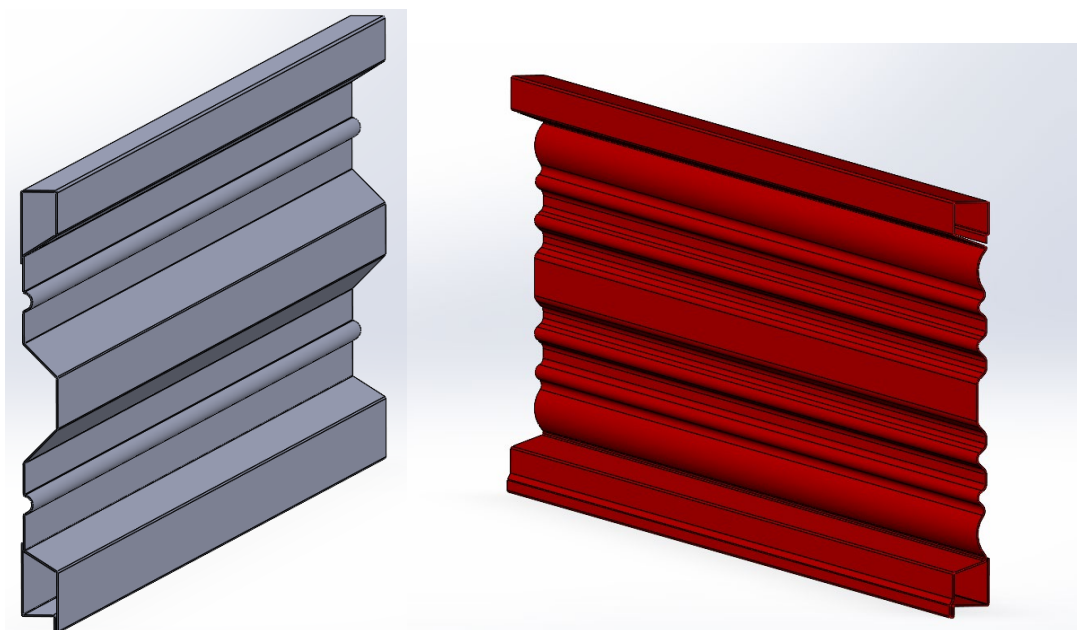


Figura 50 - Perfil *Fuhrmann* (à esquerda) e Perfil *italiano* (à direita)

A diminuição das ondulações que estas duas empresas oferecem facilita a soldadura *laser*. Por exemplo, a *Fuhrmann* fabrica os perfis com uma perfiladora e soldadura a *laser* das dobras. Oferecem uma gama de perfis entre 1 e 2,5 mm de espessura, ligas de aço começando no S235, comumente utilizado, até ao QSTE 500, com tensão de cedência aproximadamente duas vezes superior e comprimentos entre 0,5 e 13,5 m, com tolerâncias máximas de +/- 1 mm. Permite ainda escolher entre 90 diferentes tipos de perfis com alturas entre 300 e 1000 mm, assim como a produção de perfis com aço inoxidável e alumínio. Todos os componentes extra, como fechos e dobradiças, são soldados automaticamente a *laser*. Da mesma forma, a *Pronar* oferece uma grande variedade de perfis, perfilados numa linha automática e soldados a *laser*, mas esta apenas com o aço S235.

De uma forma geral, observa-se as mesmas dobradiças na lateral e retaguarda, enquanto a Herculano utiliza duas diferentes, as duas produzidas na empresa. Os fechos (Figura 51) utilizados, por exemplo, pela *Joskin* e a *Pronar*, são facilmente introduzidos num semirreboque e permitem ser desacoplados ou utilizados como eixo de rotação.

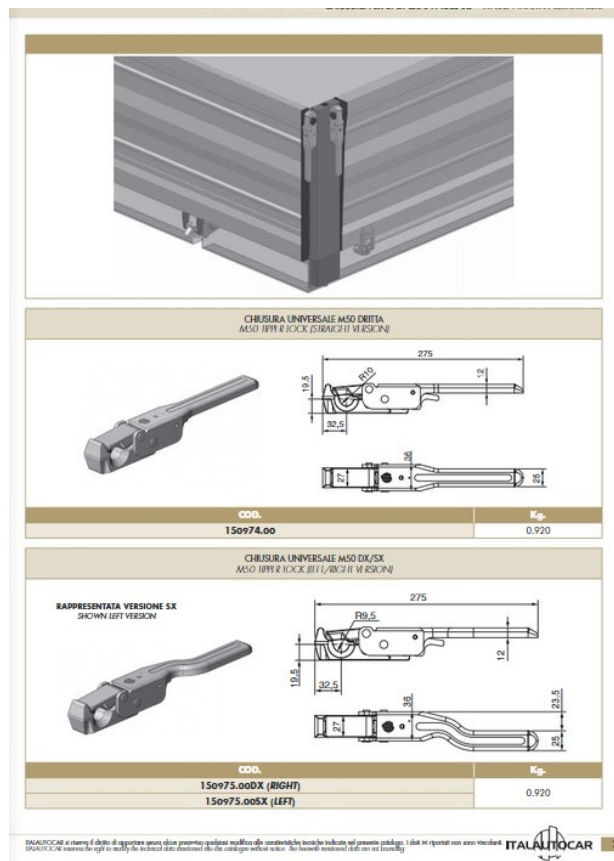


Figura 51 - Fecho com desacoplamento (Retirado de: Italaucar, 2022)

## 4.2. Análise SWOT aos produtos concorrentes

Neste subcapítulo serão analisados os produtos da concorrência por meio da ferramenta analítica SWOT, sigla que representa as seguintes análises singulares:

- *S – Strength/ Pontos fortes*: Características que dão vantagem aos produtos, comparando com outros na indústria;
- *W – Weaknesses/ Pontos fracos*: Características que colocam o produto em desvantagem relativamente aos outros;
- *O – Opportunity/ Oportunidades*: Elementos externos que beneficiam o produto;
- *T – Threat/ Ameaças*: Elementos externos que podem causar problemas ao produto.

A aplicação desta ferramenta permite identificar os pontos fortes e fracos, obtendo-se informação que permite igualar a Herculano à concorrência (Gürel, 2017).

A Tabela 15 apresenta a análise SWOT realizada.

Tabela 15 - Análise SWOT aos produtos da concorrência

| Pontos fortes                                                                                                  | Pontos fracos                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Alta cadência produtiva                                                                                        | Custo elevado de equipamento e ferramentas                  |
| Alto grau de automatização                                                                                     | Custo elevado devido ao alto nível de automatização         |
| Tolerâncias apertadas                                                                                          | Custo de encomenda de acessórios                            |
| Menor percentagem de retrabalhos                                                                               | Formação dos técnicos                                       |
| Produtos com elevada qualidade                                                                                 | Custo associado a investigação e desenvolvimento            |
| Diversidade do produto                                                                                         |                                                             |
| Oportunidades                                                                                                  | Ameaças                                                     |
| Expansão a países que possuem bom poder de compra devido à qualidade do produto                                | Preferência dos clientes a produtos mais baratos no mercado |
| Investimento em reboques basculantes que possuem uma maior procura no mercado                                  | Mudança de preços de matéria-prima                          |
| Avanço para o mercado ásia-pacífico e americano                                                                | Desenvolvimento de novas tecnologias na concorrência        |
| Utilização de estratégias de <i>marketing</i> digital para obter mais clientes e expandir o alcance da Empresa | Mudança das preferências dos clientes                       |
| Desenvolvimento de novos produtos para acompanhar a evolução das necessidades da indústria                     | Pressão de clientes em relação à sustentabilidade           |
|                                                                                                                | Competição entre grandes e pequenas empresas                |

A concorrência apresenta elevado grau de automatização, com grandes linhas de produção como foi referido em 4.1. Este facto conduz a uma maior produtividade, produção de produtos com maior qualidade, tendo um maior rigor dimensional e, consequentemente, menos retrabalhos. Todos estes fatores são indicadores de maior eficiência, sendo acompanhados de investimentos. Em concreto, o custo de equipamento e ferramentas é bastante alto, acrescentando ainda o custo associado à automatização, assim como o investimento na formação dos técnicos. O produto possui uma excelente qualidade, mas a um maior custo para o cliente. Os pequenos agricultores inclinam-se para opções mais baratas na concorrência, ainda que apresente menor qualidade. É importante que sejam constantemente desenvolvidas novas tecnologias, principalmente o uso de sistemas de ligação entre semirreboques e utilização de sensores inteligentes, visto ser uma das tendências a popularizar no mercado de semirreboques industriais (Transparency Market Research, 2021).

Em termos de volume de consumo, grande porção do mercado situa-se na zona ásia-pacífico, onde se verificou, em 2021, 42,58% da cota global do mercado de reboques para agricultura. Na zona ásia-pacífico, Índia e China, possuem cotas de mercado de 27,67% e 30,17%, respetivamente.

Também a América do Norte e América Latina, apresentam percentagens de volume do mercado 27,67% e 30,17%, respetivamente (Transparency Market Research, 2021).

### 4.3. Soluções a reter

De uma forma geral, na criação do novo perfil, o objetivo foi procurar um perfil sem ondulações e mais linear, como na concorrência, sabendo que esta opção facilita o processo de soldadura robotizado e aumenta a rigidez do perfil. A implementação da soldadura a *laser*/estudo da alternativa, pode ser avaliada. A otimização/mudança do perfil, leva a uma mudança obrigatória do *design* dos componentes. A opção de utilizar produtos de um fabricante para as dobradiças e fechos, apesar de acrescer no custo face aos que são fabricados na Herculano, garante uma melhor qualidade, diminuindo os custos indiretamente e queixas de clientes. Verifica-se assim que se ganha tempo ao não produzir estas peças na Herculano, e os operários ficam disponíveis para realizar outras atividades. A compra dos componentes deve ser comparada com o estudo e otimização dos componentes já existentes.

Estas mudanças têm todas impacto no aumento da eficiência. A mudança do perfil tem como objetivo a introdução de uma maior automatização na produção. Procurou-se também uma melhoria na consistência de produção dos acessórios, ou a introdução de componentes de fabricantes, para aumentar a qualidade da montagem final e reduzir a percentagem de retrabalhos. As alterações propostas devem aumentar a qualidade do produto, assim como diminuir o seu custo global, permitindo que seja ainda mais competitivo, principalmente com os produtores na Ásia, onde se localiza grande parte do mercado, e onde as Empresas produzem semirreboques de baixo preço, ainda que possuam uma qualidade de produto inferior.

O desenvolvimento de novas soluções deve ter em conta a evolução da indústria e clientes que procuram equipamentos mais eficientes, sustentáveis e económicos. Produtos inovadores podem ajudar a Herculano a se destacar da concorrência e aumentar a diversificação de produtos, diminuindo a dependência em alguns produtos ou gamas de produtos.

## 5. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES

O presente capítulo corresponde à segunda etapa da metodologia DSR, definição dos objetivos. Foram concebidas diferentes soluções que procuram resolver os problemas definidos no subcapítulo 3.4 e a análise à concorrência realizada no capítulo 4.

### 5.1. *Brainstorming*

Ao longo da análise do processo de manufatura dos taipais, e após o diálogo com os vários colaboradores, assim como o orientador na empresa, várias ideias de melhoria foram surgindo, tendo sido anotadas. De forma geral, as mudanças com impacto na melhoria são as seguintes:

- Estudo de diferentes materiais e processos de fabrico;
- Mudança de perfil para um mais retilíneo, evitando ondulações para facilitar o processo de soldadura robotizada MAG;
- Estudo de um novo material de adição;
- Atribuição de diferentes materiais para a chapa perfilada, dependendo das dimensões do semirreboque;
- Remoção de componentes de produção inconsistente, e substituição por um novo *design* simples, ou por peças de outros fabricantes;
- Avaliação do processo de soldadura, identificando defeitos e erros no processo, e possível redefinição dos parâmetros do processo;
- Alteração do fabrico dos semirreboques, de tal forma que qualquer componente opcional que o cliente escolha colocar no produto, esta possa ser introduzida após pintura, uniformizando o processo.

### 5.2. *Análise crítica das ideias*

Partindo da sugestão de ideias realizada em 5.1, as mesmas foram divididas em categorias, como se segue.

#### **Materiais e processos de fabrico:**

- Estudo de diferentes materiais e processos de fabrico;
- Atribuição de diferentes materiais para a chapa perfilada, dependendo das dimensões do semirreboque;
- Alteração do fabrico dos semirreboques, de tal forma que qualquer componente opcional que o cliente escolha colocar no produto, esta possa ser introduzida pós pintura, uniformizando o processo.

**Redesign e análise de componentes:**

- Remoção de componentes de produção inconsistente e substituição por um novo *design* simples, ou por peças de fabricantes;
- Mudança de perfil para um mais retilíneo, evitando ondulações para facilitar o processo de soldadura robotizada MAG.

**Processo de soldadura:**

- Avaliação do processo de soldadura, identificando defeitos e erros no processo, e possível redefinição dos parâmetros do processo;
- Estudo de um novo material de adição.

De seguida, na Tabela 16 são apresentadas as ideias, o seu grau de viabilidade, e o possível grau de impacto, se concluídas.

Tabela 16 - Indicação do grau de viabilidade e impacto de cada sugestão

| Ideia                                                                                                                                                                                               | Viabilidade<br>(1-5) | Impacto<br>(1-5) | Fator de<br>prioridade |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| 1. Estudo de diferentes materiais e processos de fabrico                                                                                                                                            | 4                    | 5                | 20                     |
| 2. Mudança de perfil para um mais retilíneo, evitando ondulações para facilitar o processo de soldadura robotizada MAG                                                                              | 3                    | 5                | 15                     |
| 3. Estudo de um novo material de adição                                                                                                                                                             | 4                    | 3                | 12                     |
| 4. Atribuição de diferentes materiais para a chapa perfilada dependendo das dimensões do semirreboque                                                                                               | 4                    | 5                | 20                     |
| 5. Remoção de componentes de produção inconsistente e substituição por um novo <i>design</i> simples ou por peças de fabricantes                                                                    | 3                    | 4                | 12                     |
| 6. Avaliação do processo de soldadura, identificando defeitos e erros no processo, e possivelmente a redefinição dos parâmetros do processo                                                         | 3                    | 4                | 12                     |
| 7. Alteração do fabrico dos semirreboques de tal forma que qualquer componente opcional que o cliente escolha colocar no produto, esta possa ser introduzida pós pintura, uniformizando o processo. | 1                    | 5                | 5                      |

A viabilidade de cada uma das sugestões depende, em grande parte, do tempo que terá de ser despendido, da dificuldade para obtenção de uma solução, e o impacto no custo que a aplicação

da solução implica. Por exemplo, a mudança do perfil e teste da sua resistência através de simulação não envolve nenhum recurso, no entanto, verificar a sua soldabilidade a *robot* implica o desenvolvimento de um protótipo, ainda que, à partida, ao eliminar linhas curvas e aplicar linhas retas no perfil, este será mais facilmente soldável a *robot*.

No outro lado do espectro, no último ponto da tabela, é apresentada a ideia mais dificilmente aplicável. O objetivo desta sugestão seria o desenvolvimento de uma caixa de carga, que após pintura, permitisse a fácil introdução de qualquer acessório extra que o cliente quisesse introduzir. Neste momento, na Herculano, certas opções que o cliente escolhe, implicam a montagem de um *chassis* e uma caixa de carga ajustadas para essa escolha. Apesar de ser notável o elevado impacto que uma solução destas conseguiria, também é notável a dificuldade da sua obtenção considerando a complexidade da caixa e quantidade de funcionalidades que pode apresentar. É por esta razão que se indica uma viabilidade de 1 e um impacto de 5.

A seleção das ideias a desenvolver é baseado no *ranking* efetuado na Tabela 16. As sugestões foram desenvolvidas por ordem do fator de propriedade, resultado da multiplicação da viabilidade pelo impacto.



## 6. PROJETO

Neste capítulo foram desenvolvidas as restantes etapas da metodologia DSR: sugestão, desenvolvimento, avaliação e conclusão.

### 6.1. Seleção do material e processos

#### 6.1.1. Definição de propriedades chave e redução dos materiais candidatos

O primeiro passo seria aplicar condicionantes ao material a utilizar. Os grupos de materiais são visíveis na Figura 52.

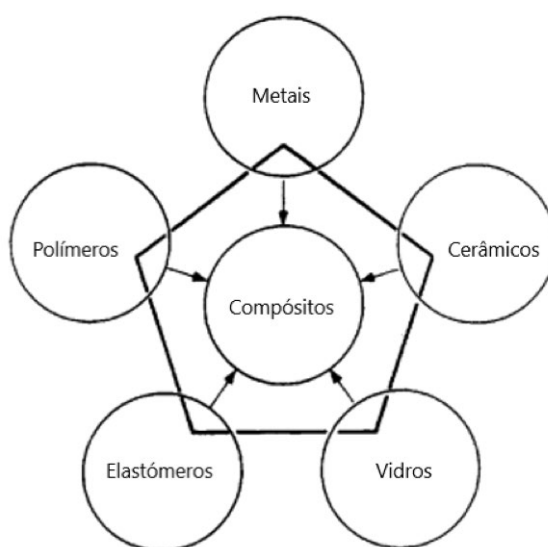


Figura 52 – Materiais de engenharia (Adaptado de: Ashby, 1999)

A matéria-prima é apresentada em formato de chapa fina e conformada para o perfil desejado. O perfil é fechado através de um processo de soldadura, e neste, são também soldados todos os componentes extra. É, portanto, importante que os materiais possuem **boa conformabilidade** e **soldabilidade**. O material deve ter módulo de **elasticidade suficiente** e uma **dureza** não muito elevada, para que seja possível a sua enformação.

O **custo** foi um fator predominante na seleção do material, sendo que é primordial que o produto desenvolvido seja competitivo em relação à concorrência. Materiais como os **compósitos** possuem um custo elevado, de forma geral. A **massa volúmica** teve, da mesma forma, uma importância significativa, eliminando uma parte da classe dos metais. O aumento do peso total do produto leva a uma diminuição da carga que o cliente pode transportar.

A **resistência à corrosão** é, também, um fator importante, tendo em conta a natureza da carga que é carregada no semirreboque, mas que, no geral, é irrelevante na escolha do material, sabendo que o material tem de ser pintado, devido a fins estéticos, pelo que é aplicado todo o tratamento de pintura que previne o processo corrosivo.

O **k<sub>1c</sub>** é uma propriedade que avalia a tenacidade à fratura e que é relevante no contexto de carga de produtos agrícolas. Quanto menor a tenacidade à fratura, maior a probabilidade de, se uma carga causar um pequeno defeito/fenda, que esta se propague e cause a rotura total do taipal.

A **tensão de cedência** é bastante importante para prevenir deformações permanentes. O **módulo de elasticidade** também deve ser alto o suficiente para que as deformações elásticas não sejam exageradas, assim como para prevenir o efeito de encurvadura.

Tabela 17 – Definição da viabilidade dos materiais

| Material                | Critério                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vidros e Cerâmicos      | Classe de material caracterizada pela sua fragilidade. Possuem baixos valores de ductilidade, tenacidade à fratura e tensão de cedência.                                                      |
| Polímeros e Elastómeros | Baixa rigidez, pelo que sofrem grandes deformações elásticas sob baixos valores de tensão instalados. Baixos valores de tensão de cedência. Não podem ser soldados por métodos convencionais. |
| Compósitos              | Apesar de apresentarem baixa densidade e excelentes propriedades mecânicas, têm um custo associado elevado.                                                                                   |
| Metais                  | Apropriados para aplicações onde as tensões elevadas são usuais. Caracterizado por altos valores de resistência mecânica sobre densidade. Possuem alta conformabilidade e soldabilidade.      |

Através da análise da Tabela 17, é possível entender que a classe de material mais indicada é a classe dos metais. A Tabela 18 apresenta requisitos de desempenho e a sua importância geral para a aplicação.

Tabela 18 - Importância geral das propriedades dos materiais a selecionar

| Propriedade            | Importância |
|------------------------|-------------|
| Custo                  | Alta        |
| Soldabilidade          | Alta        |
| Conformabilidade       | Alta        |
| Massa volúmica         | Alta        |
| Tensão de cedência     | Médio-Alta  |
| Módulo de elasticidade | Médio       |
| Tenacidade à fratura   | Média       |

Utilizando o *software* GRANTA EduPack, foram definidas condições limite de propriedades mecânicas e de processamento dos materiais. As condições consideradas foram as seguintes:

- Tensão de cedência: 190-300 MPa;
- Massa volúmica  $\leq 8 \text{ g/cm}^3$ ;
- Preço  $\leq 10 \text{ €/kg}$ ;
- Conformabilidade  $\geq 3$ ;
- Soldabilidade  $> 4$ .

A classificação dos processos está definida pelo *software* usando uma escala, sendo que o valor 1 significa que o processo não é recomendado, até ao valor de 5, que representa excelente processabilidade. De notar que o módulo de elasticidade condiciona materiais possivelmente viáveis, pelo que não é imposta nenhuma condição nesta etapa. Foi considerado um valor alto para o custo, com o objetivo de não reduzir de forma exagerada a lista de candidatos. O intervalo de tensão de cedência foi definido, tendo em conta que é utilizado aço S235 na Herculano, com tensão de cedência de 235 MPa. A massa volúmica foi condicionada tendo em conta o valor de massa volúmica do aço.

Os resultados da pesquisa foram os seguintes:

- Aço de baixo carbono;
- Aço macio;
- Aço de baixa liga;
- Aço inoxidável;
- Liga de alumínio.

### 6.1.2. Definição da soldabilidade dos materiais candidatos

A próxima etapa passou por estudar a soldabilidade de cada material, que varia bastante com a composição química, entre outros fatores, até para um mesmo material.

Começando pelos aços, aços ao carbono e aços ligados, podem ser classificados segundo a sua composição química pela norma *American Iron and Steel Institute* (AISI). A designação de cada aço é composta por quatro ou cinco dígitos. Os primeiros dois dígitos representam os principais elementos de liga (Tabela 19).

Tabela 19 - Tipos e classes de aços (retirado de: Modenesi, 2008)

| Designação da Série | Tipos e Classes                                                |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|
| 10xx                | Aço carbono não resulfurado                                    |
| 11xx                | Aço carbono resulfurado                                        |
| 13xx                | Manganês 1,75%                                                 |
| 23xx                | Níquel 3,50%                                                   |
| 25xx                | Níquel 5,00%                                                   |
| 31xx                | Níquel 1,25% - cromo 0,65 ou 0,80%                             |
| 33xx                | Níquel 3,50% - cromo 1,55%                                     |
| 40xx                | Molibdênio 0,25%                                               |
| 41xx                | Cromo 0,50-0,95% - molibdênio 0,12 ou 0,20%                    |
| 43xx                | Níquel 1,80% - cromo 0,50 ou 0,80% - molibdênio 0,25%          |
| 46xx                | Níquel 1,55 ou 1,80% - molibdênio 0,20 ou 0,25%                |
| 47xx                | Níquel 1,05% - cromo 0,450% - molibdênio 0,25%                 |
| 48xx                | Níquel 3,50% - molibdênio 0,25%                                |
| 50xx                | Cromo 0,28 ou 0,40%                                            |
| 51xx                | Cromo 0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%                          |
| 5xxx                | Carbono 1,00% - cromo 0,50, 1,00 ou 1,45%                      |
| 61xx                | Cromo 0,80 ou 0,95% - Vanádio 0,10 ou 0,15 min.                |
| 86xx                | Níquel 0,55% - cromo 0,50 ou 0,65% - molibdênio 0,20%          |
| 87xx                | Níquel 0,55% - cromo 0,50% - molibdênio 0,25%                  |
| 92xx                | Manganês 1,00% - silício 2,00%                                 |
| 93xx                | Níquel 3,25% - cromo 1,20% - molibdênio 0,12%                  |
| 94xx                | Manganês 1,00% - Níquel 0,45% - cromo 0,40% - molibdênio 0,12% |
| 97xx                | Níquel 0,55% - cromo 0,17% - molibdênio 0,20%                  |
| 98xx                | Níquel 1,00% - cromo 0,80% - molibdênio 0,25%                  |

Os últimos dígitos indicam o teor aproximado de carbono (Tabela 20).

Tabela 20 - Classificação de aços ao carbono (Retirado de: Modenesi, 2008)

| Nº SAE | C          | Mn        | P (max) | S (max) | Nº AISI |
|--------|------------|-----------|---------|---------|---------|
| 1006   | 0,08 max.  | 0,25-0,40 | 0,040   | 0,050   | C1006   |
| 1010   | 0,08-0,13. | 0,30-0,60 | 0,040   | 0,050   | C1010   |
| 1015   | 0,13-0,18  | 0,30-0,60 | 0,040   | 0,050   | C1015   |
| 1016   | 0,13-0,18. | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1016   |
| 1020   | 0,18-0,23. | 0,30-0,60 | 0,040   | 0,050   | C1020   |
| 1022   | 0,18-0,23  | 0,70-1,00 | 0,040   | 0,050   | C1022   |
| 1025   | 0,22-0,28  | 0,30-0,60 | 0,040   | 0,050   | C1025   |
| 1030   | 0,28-0,34  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1030   |
| 1040   | 0,37-0,44  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1040   |
| 1045   | 0,43-0,50  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1045   |
| 1050   | 0,48-0,55  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1050   |
| 1055   | 0,50-0,60  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1055   |
| 1060   | 0,55-0,65  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1060   |
| 1065   | 0,60-0,70  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1065   |
| 1070   | 0,65-0,75  | 0,60-0,90 | 0,040   | 0,050   | C1070   |
| 1074   | 0,70-0,80  | 0,50-0,80 | 0,040   | 0,050   | C1074   |

A designação dos últimos dígitos é, de igual forma, uma aproximação do teor de carbono, para aços ligados (Tabela 21).

Tabela 21 - Classificação de aços ao carbono

| SAE   | C         | Mn        | P (m) | S (m) | Si        | Ni        | Cr        | Outros    | AISI   |
|-------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 1320  | 0,18-0,23 | 1,60-1,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | --        | --        | 1320   |
| 1340  | 0,38-0,43 | 1,60-1,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | --        | --        | 1340   |
| 2317  | 0,15-0,20 | 0,40-0,60 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 3,25-3,75 | --        | --        | 2317   |
| 2340  | 0,33-0,43 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 3,25-3,75 | --        | --        | 2340   |
| 2512  | 0,09-0,14 | 0,45-0,60 | 0,025 | 0,025 | 0,20-0,35 | 4,75-5,25 | --        | --        | E2512  |
| 3115  | 0,13-0,18 | 0,40-0,60 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,10-1,40 | 0,55-0,75 | --        | 3115   |
| 3140  | 0,38-0,43 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,10-1,40 | 0,55-0,75 | --        | 3140   |
| 3150  | 0,48-0,53 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,10-1,40 | 0,55-0,75 | --        | 3150   |
| 3315  | 0,08-0,13 | 0,45-0,60 | 0,025 | 0,025 | 0,20-0,35 | 3,25-3,75 | 1,40-1,75 | --        | E3315  |
| Mo    |           |           |       |       |           |           |           |           |        |
| 4017  | 0,15-0,20 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | --        | 0,20-0,30 | 4017   |
| 4042  | 0,40-0,45 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | --        | 0,20-0,30 | 4045   |
| 4068  | 0,63-0,70 | 0,75-1,00 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | --        | 0,20-0,30 | 4068   |
| 4130  | 0,28-0,33 | 0,40-0,60 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | 4130   |
| 4140  | 0,38-0,43 | 0,75-1,00 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | 0,80-1,10 | 0,18-0,25 | 4140   |
| 4320  | 0,17-0,22 | 0,45-0,65 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,65-2,00 | 0,40-0,60 | 0,20-0,30 | 4320   |
| 4340  | 0,38-0,43 | 0,60-0,80 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,65-2,00 | 0,70-0,90 | 0,20-0,30 | 4340   |
| 4615  | 0,13-0,18 | 0,45-0,65 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,65-2,00 | --        | 0,20-0,30 | 4615   |
| 4640  | 0,38-0,43 | 0,60-0,80 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 1,65-2,00 | --        | 0,20-0,30 | 4640   |
| 4820  | 0,18-0,23 | 0,50-0,70 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 3,25-3,75 | --        | 0,20-0,30 | 4820   |
| 5045  | 0,43-0,48 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | 0,55-0,75 | --        | 5045   |
| 5130  | 0,28-0,33 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | 0,80-1,10 | --        | 5130   |
| 50100 | 0,95-1,10 | 0,25-0,45 | 0,025 | 0,025 | 0,20-0,35 | --        | 0,40-0,60 | --        | E50100 |
| 52100 | 0,95-1,10 | 0,25-0,45 | 0,025 | 0,025 | 0,20-0,35 | --        | 1,30-1,60 | --        | E52100 |
| V     |           |           |       |       |           |           |           |           |        |
| 6150  | 0,48-0,53 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | --        | 0,80-1,10 | 0,15 min. | 6150   |
| Mo    |           |           |       |       |           |           |           |           |        |
| 8615  | 0,13-0,18 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 0,40-0,70 | 0,50-0,60 | 0,15-0,25 | 8615   |
| 8740  | 0,38-0,43 | 0,75-1,00 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 0,40-0,70 | 0,40-0,60 | 0,20-0,30 | 8740   |
| 9260  | 0,55-0,65 | 0,70-1,00 | 0,040 | 0,040 | 1,80-2,20 | --        | --        | --        | 9260   |
| 9440  | 0,38-0,43 | 0,90-1,20 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 0,30-0,60 | 0,30-0,50 | 0,08-0,15 | 9440   |
| 9840  | 0,38-0,43 | 0,70-0,90 | 0,040 | 0,040 | 0,20-0,35 | 0,85-1,15 | 0,70-0,90 | 0,20-0,30 | 9840   |

A soldabilidade de um material pode ser dividida em soldabilidade de fabrico e de serviço. A soldadura de fabrico diz respeito à propensão do material de formar descontinuidades prejudiciais durante o processo de soldadura. A soldadura também deve ser capaz de cumprir a tarefa que lhe é atribuída sem que surjam fissuras a frio, mordeduras a quente, bem como porosidades. A soldadura de serviço refere-se à capacidade de a soldadura possuir as propriedades necessárias para a aplicação.

Os aços podem ser classificados quanto ao teor de carbono da seguinte forma:

- Aço de baixo carbono (Até 0,15% Carbono);
- Aço macio (0,15 a 0,3 % Carbono);
- Aço de médio carbono (0,3 a 0,5%);
- Aço de alto carbono (0,5 a 1% Carbono). Até 2% no caso dos aços ledeburíticos.

O aumento da percentagem de carbono aumenta a dureza e resistência mecânica, no entanto, reduz a soldabilidade devido à elevada tendência à formação de martensite. Em soldadura, é utilizado o termo carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) para avaliar a soldabilidade de aços de baixo carbono e de baixa liga. O valor calculado representa a contribuição da composição química à formação de fissuras induzidas pelo hidrogénio no aço (Silva, 2022).

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} \quad (9)$$

A equação é válida para os seguintes intervalos de percentagens de elementos de liga:

- %C < 0,50;
- %Mn < 1,60;
- %Ni < 3,50;
- %Mo < 0,60;
- %Cr < 1,00;
- %Cu < 1,00.

Baixos valores de  $C_{eq}$  traduzem-se num aço com baixa temperabilidade e excelente soldabilidade, principalmente para  $C_{eq} < 0,14\%$ . Altas concentrações de  $C_{eq}$  aumentam a dureza, resistência mecânica, resistência ao desgaste e temperabilidade do aço, assim como a rigidez do cordão de soldadura. No entanto, verifica-se uma diminuição na tenacidade e ductilidade, e o aparecimento de fissuração a frio do cordão. A soldadura torna-se difícil para valores de  $C_{eq} > 0,45\%$  (Silva, 2022).

Aços de baixo carbono possuem um teor baixo de carbono e, consequentemente, um valor baixo de  $C_{eq}$ , que se traduz numa excelente soldabilidade. O valor de carbono equivalente para estes aços situa-se normalmente entre 0,2 e 0,5%. Isto quer dizer que para um mesmo teor de carbono, um aço de baixo carbono pode ter melhor ou pior soldabilidade, dependendo dos elementos de liga. Estes aços podem desenvolver fissuração durante a enformação a frio, se arrefecidos rapidamente (Silva, 2022).

Aços de baixa liga (% de elementos de liga < 5%), quando projetados para construção soldada, geralmente possuem um teor de Carbono abaixo de 0,25% e, na maioria dos casos, abaixo de 0,15%, para que o valor de  $C_{eq}$  seja o menor possível. São introduzidos na liga elementos como o Níquel, Crómio, Molibdénio, Manganês e Silício, que incrementam a resistência mecânica à temperatura ambiente e aumentam a tenacidade à fratura a baixa temperatura. A soldadura deve ser realizada no estado de recozido, usando processo de baixo aporte térmico e com recurso preferencialmente a processos automáticos, relativamente aos manuais (Silva, 2022).

Nos aços macios não tratados, para um teor de Carbono igual a 0,15% e teor de Manganês menor do que 1%, não são requeridos cuidados especiais. No entanto, na situação em que os teores de Carbono e Manganês aumentam, o cordão torna-se suscetível à fissuração por Hidrogénio.

A utilização de aços de médio carbono introduz a necessidade de pré-aquecimento a partir de 0,45% de  $C_{eq}$ , de forma a controlar a taxa de arrefecimento, sendo que este tipo de aço apresenta problemas como: formação de martensite na ZTA, baixa tenacidade e fissuração devido a Hidrogénio. O material de adição deve conter baixo hidrogénio e deve ser aplicado também um pós tratamento de alívio de tensões. Para a presente aplicação, não existem vantagens na utilização de aços de médio carbono, considerando todos os passos extra que são necessários para garantir uma boa soldadura. Desta forma, foram considerados para a matriz de seleção aços de baixo carbono e aços macios, assim como aços ligados de máximo 0,25% de teor de carbono.

## Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são uma liga caracterizada pela sua resistência à corrosão. O principal elemento de liga é o Crômio (Cr) – com teor acima de 12%. O Crômio cria uma camada fina de óxido de Crômio ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) na superfície, a qual protege o aço contra a corrosão (Silva, 2018).

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em: martensíticos, ferríticos, austenítico e *duplex* (austenite+ferrite). Dentro destes, os que apresentam melhor soldabilidade são os aços inoxidáveis austeníticos e, de seguida, os *duplex*. Tendo em conta a aplicação, a vantagem do aço inoxidável é, essencialmente, a sua resistência à corrosão. No entanto, este terá ainda de ser pintado, como qualquer caixa de carga da Herculano, para efeitos estéticos.

## Ligas de alumínio

As ligas de alumínio podem ser classificadas por um conjunto de quatro dígitos, classificação segundo a *Aluminum Association* (AA). A Figura 53 apresenta essa nomenclatura.

| Ligas Trabalhadas                                                                                       |                     | Ligas Fundidas                                                                                                                                                                                                            |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Os materiais são indicados por quatro dígitos:                                                          |                     | Os materiais são indicados por três dígitos, um ponto e um quarto dígito:                                                                                                                                                 |                               |
| <b>1º Dígito</b> - classifica a liga pela série consoante o elemento associado;                         |                     | <b>1º Dígito</b> - classifica a liga pela série consoante o elemento associado;                                                                                                                                           |                               |
| <b>2º Dígito</b> - (se diferente de zero) significa modificação da liga básica;                         |                     | <b>2º e 3º Dígito</b> - caracterizam as ligas de composição específica;                                                                                                                                                   |                               |
| <b>3º e 4º Dígito</b> - indica o teor mínimo de alumínio ou identifica a composição específica de liga. |                     | <b>4º Dígito</b> - (a seguir ao ponto) se for zero significa peça fundida, se for um significa material em forma de lingote;<br>Caso haja modificação da liga básica adiciona-se uma letra maiúscula no final (ex.: A,B). |                               |
| Série                                                                                                   | Composição          | Série                                                                                                                                                                                                                     | Composição                    |
| 1XXX                                                                                                    | Mín. 99% Alumínio   | 1XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Mín. 99% Alumínio             |
| 2XXX                                                                                                    | Cobre               | 2XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Cobre                         |
| 3XXX                                                                                                    | Manganês            | 3XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Silício e Cobre e/ou Magnésio |
| 4XXX                                                                                                    | Silício             | 4XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Silício                       |
| 5XXX                                                                                                    | Magnésio            | 5XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Magnésio                      |
| 6XXX                                                                                                    | Magnésio e Silício  | 6XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Série não utilizada           |
| 7XXX                                                                                                    | Zinco               | 7XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Zinco                         |
| 8XXX                                                                                                    | Outros elementos    | 8XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Estanho                       |
| 9XXX                                                                                                    | Série não utilizada | 9XX.X                                                                                                                                                                                                                     | Outros elementos              |

Figura 53 - Nomenclatura do sistema de classificação de ligas de alumínio (Retirado de: Silva, 2022)

As ligas de alumínio que apresentam uma boa soldabilidade são as seguintes:

- Série 3XXX – Boa soldabilidade, fácil enformação e endurecimento por encruamento;

- Série 4XXX – Boa soldabilidade, no entanto sofre fragilização na ZTA, tornando-se necessário um tratamento térmico pós-soldadura. É utilizado como material de adição para soldar a série 6XXX;
- Série 5XXX – Boa soldabilidade, no entanto, usando um metal de adição da mesma composição, deve apresentar teor de magnésio acima de 2,5%, para evitar fissuração a quente aquando da solidificação;
- Série 6XXX – Boa soldabilidade, amplamente utilizada em construção soldada. Suscetível a fissuração a quente.

Dentro destas ligas, as séries 2XXX e 6XXX, são tratáveis termicamente. Nestas ligas, aquando do processo de soldadura, a ZTA e o cordão de soldadura apresentam uma resistência mecânica inferior ao material de base, pelo que é necessário aplicar um tratamento térmico para reestabelecer as propriedades mecânicas pretendidas (Silva, 2022). Devido a estes procedimentos extra, que se consideram pouco práticos para aplicação na Herculano, foram consideradas apenas as ligas de alumínio das séries 4XXX e 5XXX.

### 6.1.3. Definição do peso para cada propriedade

Com o objetivo de definir os pesos relativos das propriedades dos materiais, foi efetuada uma tabela de ponderação. A propriedade mais relevante é o custo do material, seguida da massa volúmica. É importante que o produto final seja o mais barato e leve possível.

A soldabilidade é um fator bastante importante para a aplicação do material, e todos os materiais que se encontram na matriz de seleção possuem uma boa ou excelente soldabilidade, segundo o estudo desenvolvido em 6.1.2. Nas condições iniciais, já foi condicionada a tensão de cedência mínima para a qual um material pode ser usado para a chapa perfilada.

Na Tabela 22 são definidos os valores para o peso relativo de cada propriedade.

|                      | Custo | Massa volúmica | Tenacidade à fratura | Soldabilidade | Ponderação | Ponderação % |
|----------------------|-------|----------------|----------------------|---------------|------------|--------------|
| Custo                | 100   | 55             | 80                   | 90            | 325        | 32,5         |
| Massa volúmica       | 45    | 100            | 75                   | 85            | 305        | 30,5         |
| Tenacidade à fratura | 20    | 25             | 100                  | 80            | 225        | 22,5         |
| Soldabilidade        | 10    | 15             | 20                   | 100           | 145        | 14,5         |
| Total                | 175   | 195            | 275                  | 355           | 1000       | 100,0        |

Tabela 22 - Cálculo do peso relativo das propriedades

Utilizando o MS Excel® (Tabela 22), foram comparadas as propriedades individualmente, atribuindo pontuações de 0 a 100. Por exemplo, como o custo é ligeiramente mais importante do que a massa volúmica, foi atribuída uma pontuação de 55, para os 45 da massa volúmica. De seguida, comparando o custo com o resto das propriedades, foram utilizadas as seguintes pontuações: 80/20 e 90/10, para representar a menor importância destas em comparação com o custo. No final, foram somadas as pontuações de cada propriedade e divididas pelo somatório de todas as

pontuações, obtendo os valores em percentagem que serão utilizados na matriz de seleção do material.

#### 6.1.4. Escolha dos materiais e realização da matriz de seleção

Foram escolhidos dois materiais por cada classe, sendo um deles o S235, que é utilizado correntemente na Herculano, e o DX51D, que é utilizado no fabrico da chapa trapezoidal da Ferpinta, mencionada no capítulo 6.2.2.

Na Figura 54 verificamos a matriz de seleção de materiais realizada.

|                      | Ponderação (%) | 32,5         |       | 30,5                                |       | 22,5                          |       | 14,5          |     |                                   |
|----------------------|----------------|--------------|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------|-------|---------------|-----|-----------------------------------|
|                      | Material       | Custo (€/kg) |       | Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> ) |       | Tenacidade à fratura (MPa √m) |       | Soldabilidade |     | Índice de performance do material |
| Aço ao baixo carbono | S235JR         | 1,7          | 100,0 | 7850                                | 34,0  | 40                            | 100,0 | 5             | 100 | 79,9                              |
| Aço ao baixo carbono | DX51D          | 1,7          | 100,0 | 7850                                | 34,0  | 40                            | 100,0 | 5             | 100 | 79,9                              |
| Aço ao baixo carbono | AISI 1015      | 1,7          | 100,0 | 7850                                | 34,0  | 40                            | 100,0 | 5             | 100 | 79,9                              |
| Aço baixa liga       | ASTM A370      | 1,7          | 100,0 | 7850                                | 34,0  | 40                            | 100,0 | 5             | 100 | 79,9                              |
| Aço inoxidável       | AISI 310S      | 9,5          | 17,9  | 7810                                | 34,2  | 40                            | 100,0 | 4             | 100 | 53,2                              |
| Aço inoxidável       | 316L           | 8,8          | 19,4  | 8030                                | 33,3  | 40                            | 100,0 | 4             | 100 | 53,5                              |
| Liga alumínio        | 4043           | 3,8          | 45,3  | 2670                                | 100,0 | 30                            | 75,0  | 3             | 60  | 70,8                              |
| Liga alumínio        | 5083           | 5,0          | 34,0  | 2670                                | 100,0 | 30                            | 75,0  | 3             | 60  | 67,1                              |

Figura 54 - Matriz de seleção de materiais

Os aços de baixo carbono e de baixa liga são os materiais mais indicados para a chapa perfilada, destacando-se pelo maior índice de desempenho de material. Enquanto as ligas de alumínio são bastante menos densas, o que resulta num semirreboque mais leve, são mais dispendiosas, e ainda apresentam menores índices de tenacidade à fratura, assim como soldabilidade, comparativamente aos aços.

Os valores específicos de custo, massa volúmica, e até mesmo da tenacidade à fratura, até para um mesmo material, dependem bastante do formato como o material é entregue, assim como de fornecedor para fornecedor. A escolha entre cada um dos aços ao carbono e aço de baixa liga depende principalmente da disponibilidade do fornecedor e custos fornecidos, portanto, seria necessária uma análise mais profunda para obter o material ideal.

## 6.2. Dimensionamento do perfil

### 6.2.1. Design inicial e cálculo de esforços instalados

Numa fase inicial, desenhou-se em CAD 3D, no *software* DS Solidworks®, vários perfis.

O *design* deve ter em conta a maximização do momento de inércia do taipal, apenas através da alteração do perfil. O novo perfil deve permitir uma maior facilidade no processo de soldadura robotizada.

Foram então criados os seguintes perfis:

- Perfil *Fuhrmann*, utilizado na Herculano;
- Perfil tipo *Fuhrmann* modificado, alterando o *Fuhrmann* com vista ao aumento do momento de inércia.

Na Figura 50 são visíveis os perfis de referência, italiano e *Fuhrmann*. Na Figura 55, é possível observar o taipal *Fuhrmann* alterado, de forma a maximizar o momento de inércia.

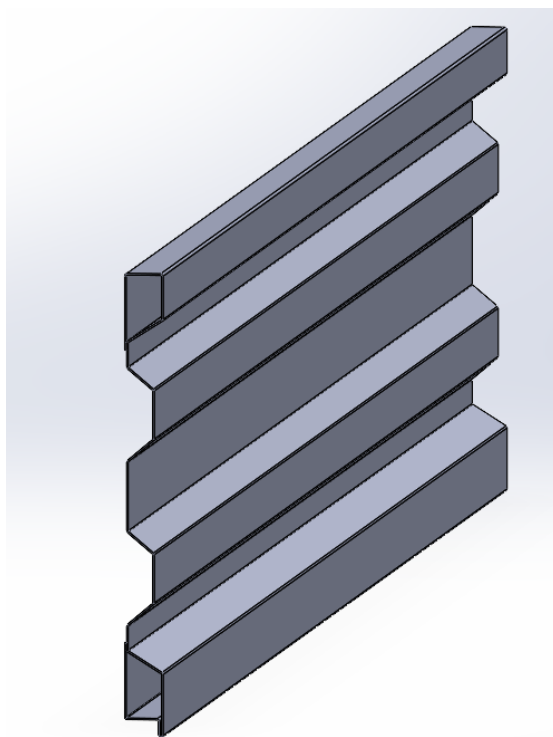


Figura 55 - Perfil *fuhrmann* modificado

Os taipais desenhados têm como base o semirreboque S1ET 3.0x1.6, que possui 3 m de comprimento e 1,6 m de largura, com 0,5 m de altura. De seguida, através da opção “*Section Properties*”, foram retirados os valores da área da secção e momento de inércia no eixo vertical e horizontal. Com estes valores, é possível avaliar o efeito de encurvadura.

A definição da carga parte inicialmente pela consideração do valor de peso próprio a utilizar e da altura do taipal. Os valores considerados são:

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ;
- $H = 0,5 \text{ m}$ .

O valor de ângulo de atrito da terra a utilizar será  $\phi = 30^\circ$ , considerando *good soil* (Figura 6). Substituindo este valor na equação (2) temos que,

$$K = 1 - \sin(30^\circ) = 0,5 \quad (10)$$

Substituindo o valor calculado em (10) e os considerados acima, da equação (1) é retirada distribuição da pressão segundo a profundidade do perfil.

$$P = \frac{1}{2} * 0,5 * 20 * 0,5 * H = 2,5 * H \left[ \frac{kN}{m^2} \right] \quad (12)$$

Seguidamente, avaliando o comportamento à encurvadura dos perfis, foi calculada a esbelteza normalizada. Para isto, foi primeiro preciso calcular a carga crítica de Euler, obtida através do menor Momento de Inércia, neste caso,  $I_y$  para todas as chapas. A esbelteza normalizada depende da área da secção, da tensão de cedência do material e da carga crítica de Euler. Estes valores poderão ser observados na Figura 56, assim como os dados da secção.

|                        | Dados secção                      | Fuhrmann    | Fuhrmann modificado | Italiana    |      |
|------------------------|-----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|------|
|                        | Área (mm <sup>2</sup> )           | 1307,65     | 1328,3              | 1244,7      |      |
|                        | Inércia eixo x (mm <sup>4</sup> ) | 40925649,16 | 41419423,09         | 39272613,43 |      |
|                        | Inércia eixo y (mm <sup>4</sup> ) | 389966,91   | 332745,33           | 274905,87   |      |
|                        | Aumento inércia x                 | 4,2%        | 5,5%                | -           |      |
|                        | Aumento inércia y                 | 41,9%       | 21,0%               | -           |      |
| Encurvadura            | i=                                | 17,269      | 15,827              | 14,861      | (mm) |
| Esbelteza              | $\lambda$ =                       | 14,48       | 15,80               | 16,82       |      |
| Carga crítica de Euler | Nr=                               | 12932032    | 11034458            | 9116393     | (N)  |
| Esbelteza normalizada  | $\lambda$ =                       | 0,154       | 0,168               | 0,179       |      |
| Dados do material      |                                   |             |                     |             |      |
| E=                     | 2,1E+11                           | (Pa)        |                     |             |      |
| f <sub>y</sub> =       | 235                               | (MPa)       |                     |             |      |
| e=                     | 1,5                               | (mm)        |                     |             |      |

Figura 56 - Cálculo da esbelteza normalizada

Como a esbelteza normalizada é menor do que 0,2, segundo EN 1993-1-1 (2010), Eurocódigo 3, parte 1-1, foi possível desprezar os efeitos de encurvadura. É de notar que o perfil italiano possui menores valores de Momento de Inércia do que os outros dois perfis.

### 6.2.2. Iteração do perfil inicial

Foi coordenada uma visita à Ferpinta, para entender a possibilidade da perfiladora existente produzir o perfil *Fuhrmann* modificado desenvolvido. O perfil produzido na Ferpinta pode ser observado na Figura 57.

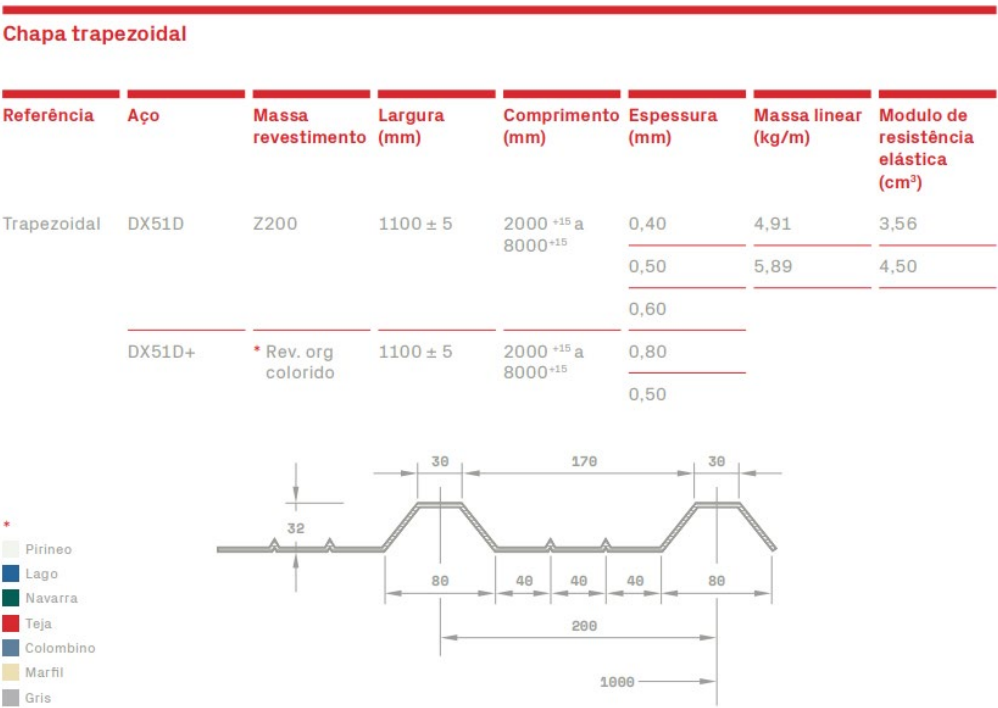


Figura 57 - Chapa trapezoidal Ferpinta (Ferpinta, 2023)

O perfil apresentado é a chapa trapezoidal Ferpinta. Este perfil trapezoidal está bastante limitado em termos de alterações, não podendo ser alterada a profundidade nem a largura dos excêntricos. Dito isto, seria possível a manufatura do perfil *Fuhrmann* modificado desenvolvido, mas a mesma implicaria a produção de novos rolos para a perfiladora, solução bastante dispendiosa tendo em conta a quantidade de perfil deste tipo que é utilizado na Herculano. No entanto, este perfil trapezoidal é bastante similar ao perfil desenvolvido anteriormente.

A parte inferior do perfil *Fuhrmann* modificado (Figura 55), dobra sobre si mesma para oferecer suporte de montagem e vedar a carga com a pequena aba. A solução para adaptar a chapa trapezoidal à aplicação está apresentada na Figura 58.

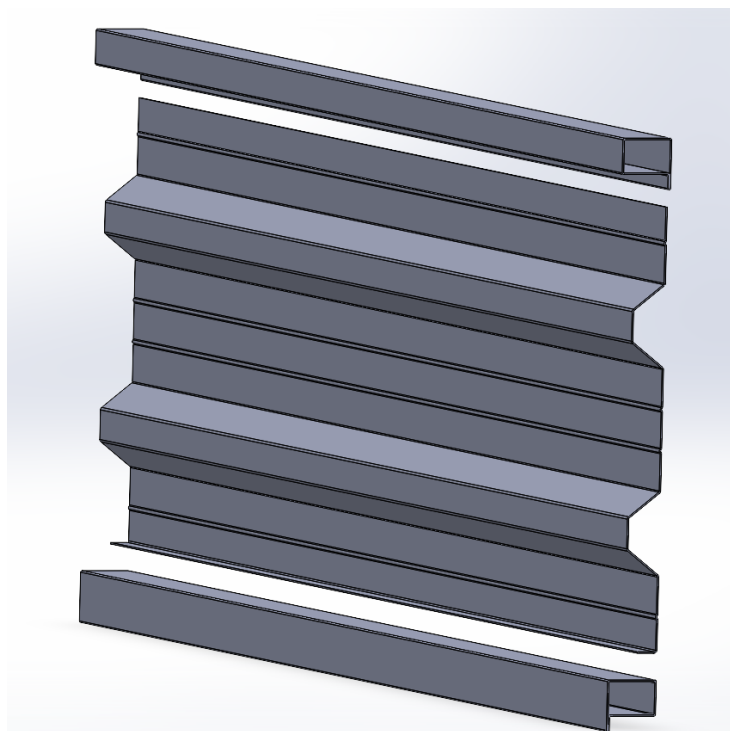
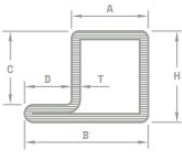


Figura 58 – Vista explodida da montagem da chapa trapezoidal Ferpinta com perfil FT 24

A aplicação do *design for manufacturing* permitiu que o *design* fosse adaptado às condições do fabricante. Ao adicionar o perfil FT (Figura 59) à chapa trapezoidal, é adicionada a função de suporte de montagem, assim como vedação da carga. O perfil FT é fabricado pela Ferpinta e é caracterizado pelo seu perfil tubular retangular com aba. Em concreto, é utilizado o perfil FT 24.

A Ferpinta fabrica o perfil trapezoidal (Figura 57) com um máximo de 0,8 mm de espessura, sendo esta espessura pouco indicada em termos de resistência aos esforços instalados numa caixa de carga de um semirreboque agrícola, assim como em aplicações de construção soldada. Disto isto, seria necessária a possibilidade de fabrico da chapa com uma espessura superior, de no mínimo 1 mm até 1,5 mm de espessura. Com o objetivo de produção de um protótipo, para efeitos de verificação de montagem, foi utilizada chapa trapezoidal de 0,5 mm, a única disponível em *stock* no decorrer do desenvolvimento desta solução.

Construção civil  
DX51D, E220, E235, S235JR, DC01  
Outros (sob consulta)



| Referência | Dimensões |    | A  | C  | D  | T   | Massa linear<br>(kg/m) | Tubos/Atado | Peso/Atado<br>(kg) |
|------------|-----------|----|----|----|----|-----|------------------------|-------------|--------------------|
|            | B         | H  |    |    |    |     |                        |             |                    |
| FT 14      | 43        | 40 | 30 | 37 | 14 | 1,5 | 1,942                  | 100         | 1165               |
| FT 15      | 47        | 34 | 35 | 31 | 12 | 1,5 | 1,810                  | 100         | 1086               |
| FT 17      | 35        | 20 | 20 | 17 | 15 | 1,5 | 1,213                  | 100         | 728                |
| FT 18      | 30        | 35 | 15 | 32 | 15 | 1,5 | 1,484                  | 100         | 890                |
| FT 19      | 59        | 50 | 40 | 46 | 19 | 2,0 | 3,352                  | 64          | 1287               |
| FT 23      | 35        | 50 | 20 | 46 | 15 | 2,0 | 2,521                  | 100         | 1516               |
| FT 24      | 50        | 50 | 35 | 47 | 15 | 1,5 | 2,310                  | 80          | 1109               |

Figura 59 - Perfil FT Ferpinta (Ferpinta, 2023)

Também, da forma como a montagem da Figura 58 está apresentada, a soldadura entre os componentes ficaria visível para o cliente, pormenor não desejável do ponto de vista estético. Desta forma, foi discutida na Herculano uma nova solução, e conseguida a apresentada na Figura 60.

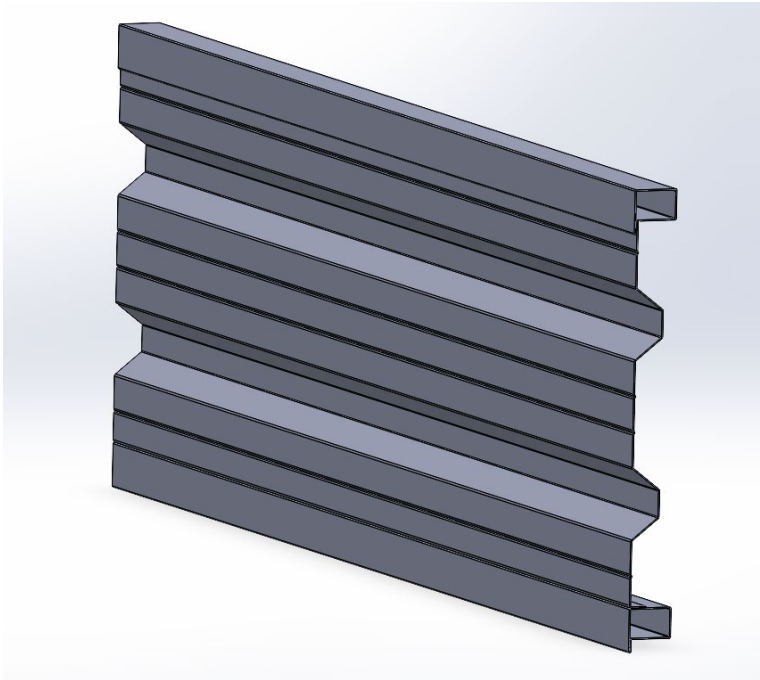


Figura 60 - Nova montagem da chapa trapezoidal Ferpinta com perfil FT 24

Ao inverter a chapa trapezoidal, não só é possível a soldadura no interior da caixa, melhorando a componente estética da montagem, como é oferecida uma superfície lisa maior, que permite uma maior facilidade na montagem das dobradiças.

O desenho técnico da montagem do taipal lateral está visível no Apêndice A.

### 6.2.3. Validação por simulação

#### 6.2.3.1. Validação do perfil inicial

Simulações lineares estáticas foram realizadas no *software* DS Solidworks® ao *design* inicial dos taipais, com o objetivo de validar a sua resistência. O material utilizado foi o aço da norma ASTM – A36, que possui propriedades bastante próximas às do S235 utilizado na Herculano. O aço A36 possui uma tensão de cedência de 250 MPa, enquanto o aço S235 tem 235 MPa. A espessura da chapa é de 1,5 mm.

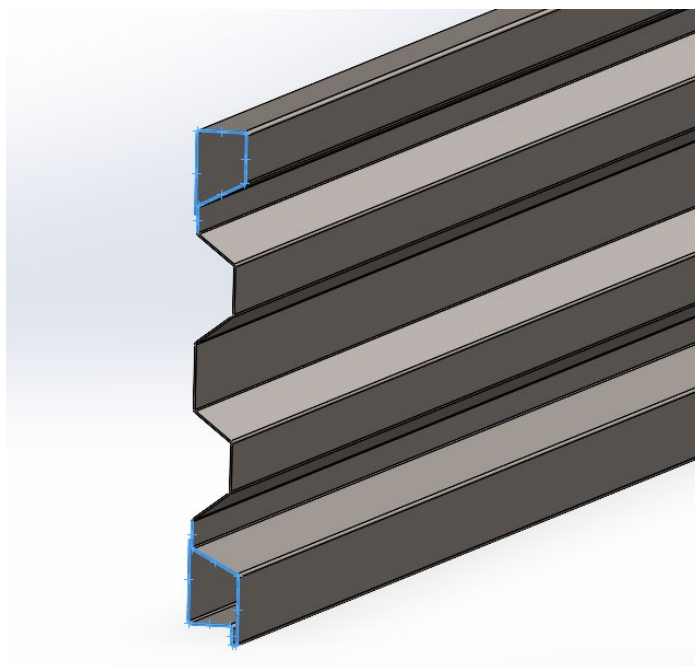


Figura 61 - Fixação do taipal

Relativamente à fixação do taipal, este foi encastrado, usando “*Fixed Geometry*” apenas nas dobras/topos, isto porque a fixação do taipal no reboque é aproximadamente nestas zonas, através da utilização dos fechos. Foi então aplicada a pressão visível na Figura 62. A carga é aplicada utilizando a função “*Pressure*”, e introduzindo o valor descrito na Tabela 23.

Tabela 23 – Valores de carga utilizados na simulação

| Origem da carga | Valor da carga               |
|-----------------|------------------------------|
| Carga na caixa  | $2,5 \cdot H \text{ kN/m}^2$ |

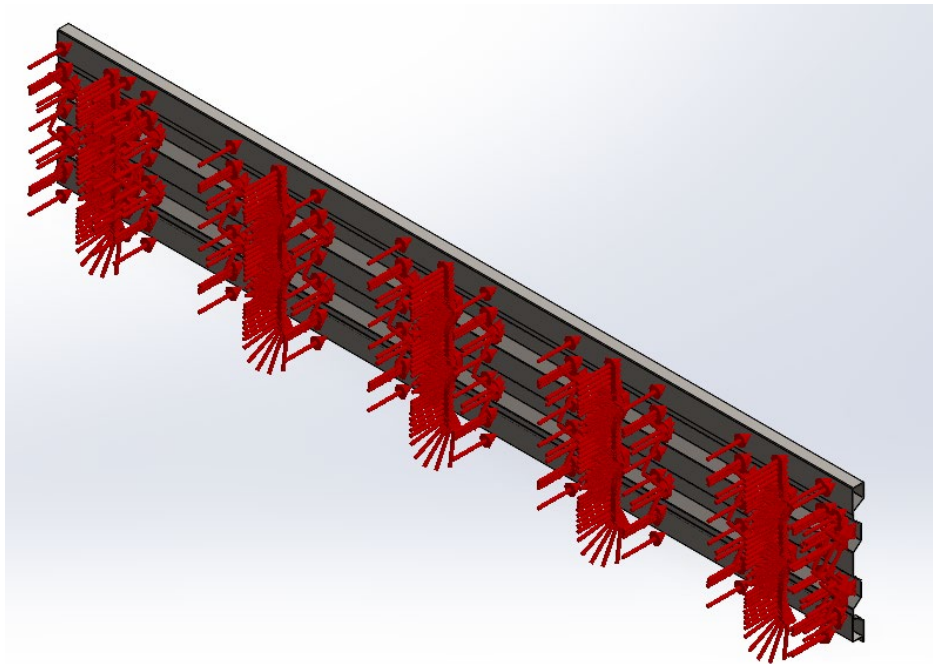


Figura 62 - Aplicação das cargas na chapa

Após a seleção do material e definidas as condições de fronteira e a carga, é criada a malha (Figura 63).

| Mesh Details                          |                 |
|---------------------------------------|-----------------|
| Study name                            | modificado 2 m  |
| DetailsMesh type                      | Shell Mesh Usir |
| Mesher Used                           | Blended curvati |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 points       |
| Max Element Size                      | 200 mm          |
| Min Element Size                      | 10 mm           |
| Mesh quality                          | High            |
| Total nodes                           | 93729           |
| Total elements                        | 46712           |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss)       | 00:00:16        |
| Computer name                         |                 |

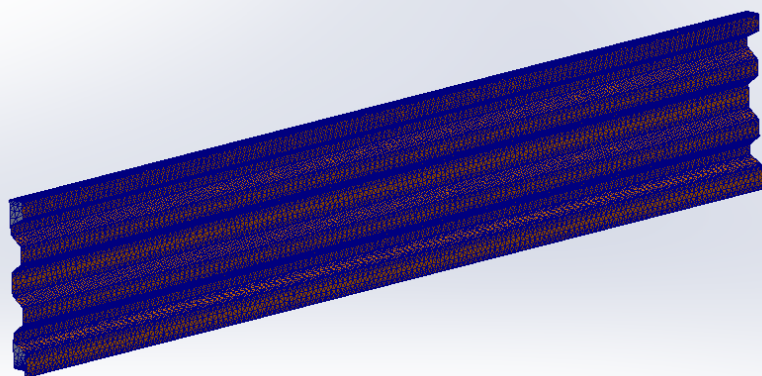


Figura 63 - Malhas e propriedades da malha utilizadas

De seguida, foi iniciada a simulação e analisados os resultados. Na Figura 64 é possível visualizar os valores de tensão equivalente *Von Mises* instalados na chapa.

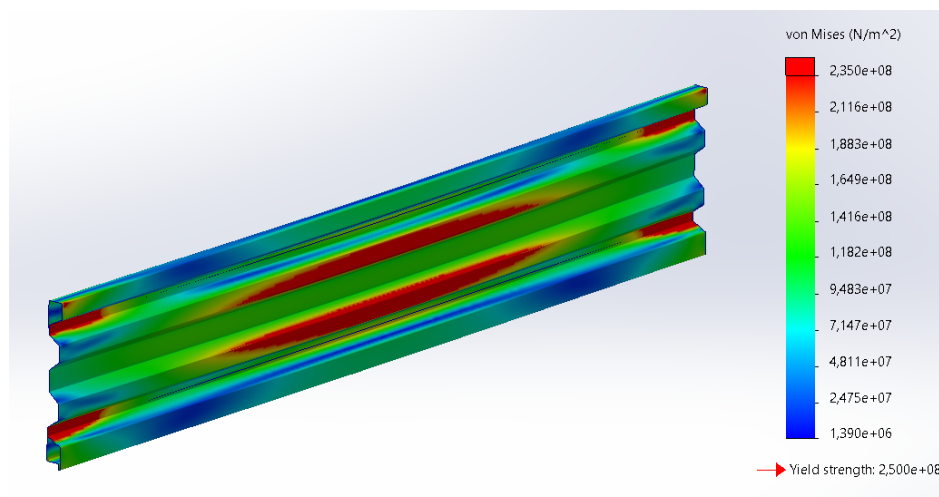


Figura 64 - Distribuição de tensão equivalente de *Von Mises* no perfil

A escala foi adaptada para um valor máximo de 235 MPa, valor da tensão de cedência do S235, apesar de ter sido utilizado o aço A36 na simulação, para entender o comportamento que o aço utilizado pela Herculano teria. A tensão equivalente foi ultrapassada a meio vão, a zona crítica expectável, com valores que rondam os 310 MPa. As zonas a vermelho perto das extremidades, são zonas de concentração de tensões que foram consideradas como desprezáveis. Os valores de deformação instalados na chapa apresentam-se na Figura 65.

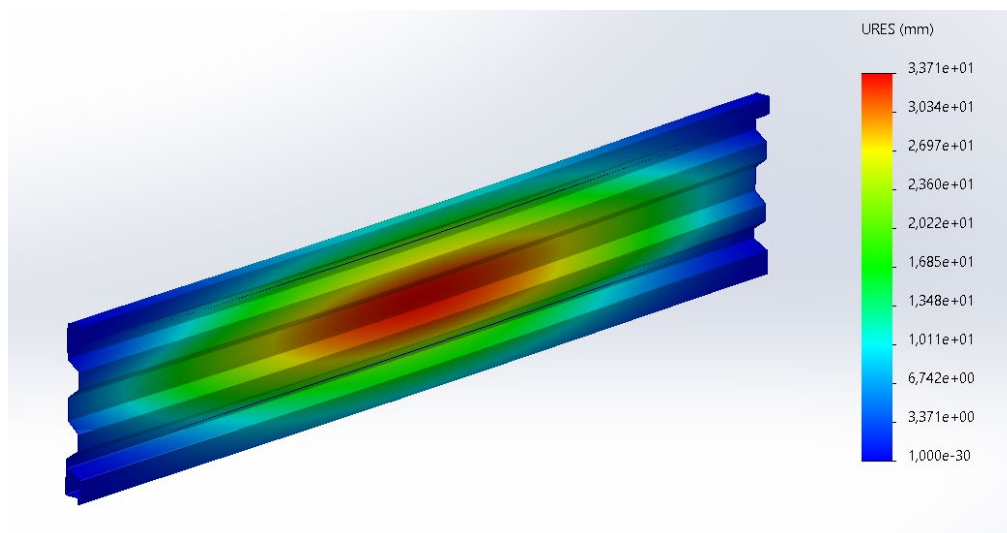


Figura 65 - Distribuição da deformação no perfil

O valor de deformação máximo é de 33,7 mm. A deformação é considerada significativa, tendo em conta que parte desta é permanente. Da mesma forma, foi realizada a simulação para a chapa de 1,5 mm. Os valores de tensão, neste caso, são de 375 MPa e a deformação de 46,7 mm.

A utilização do aço S235 é completamente desaconselhada por estes resultados, que indicam que se deve utilizar, no caso da chapa de 1,5 mm, um material com tensão de cedência de 375 MPa.

### 6.2.3.2. Análise da caixa de carga

De forma a avaliar mais profundamente o perfil desenvolvido, foi criado um modelo de uma caixa de carga, similar ao utilizado na Herculano, sendo esta análise uma melhor aproximação da realidade do que a simples análise do perfil.

A caixa de carga estudada é visível na Figura 66. É composta pelos taipais laterais, frontal e traseiro, com perfil *Fuhrmann* modificado de 2 mm de espessura, ligados entre si pelas colunas, dobradiças e pelos fechos, ou no caso do taipal frontal, soldado diretamente às colunas. A Herculano facultou o modelo 3D do S1ET 3x1,6, no entanto, apenas algumas partes foram utilizadas para a análise numérica, devido à complexidade do modelo. Nomeadamente, foram usadas as colunas, os fechos e as travessas que servem como apoio da estrutura, em conjunto com a chapa visível no meio da caixa de carga. Ainda foi utilizada outra dobradiça, pelo facto de o *design* da dobradiça da Herculano estar adaptado às curvaturas do taipal italiano, enquanto o *Fuhrmann* é liso (Figura 50).

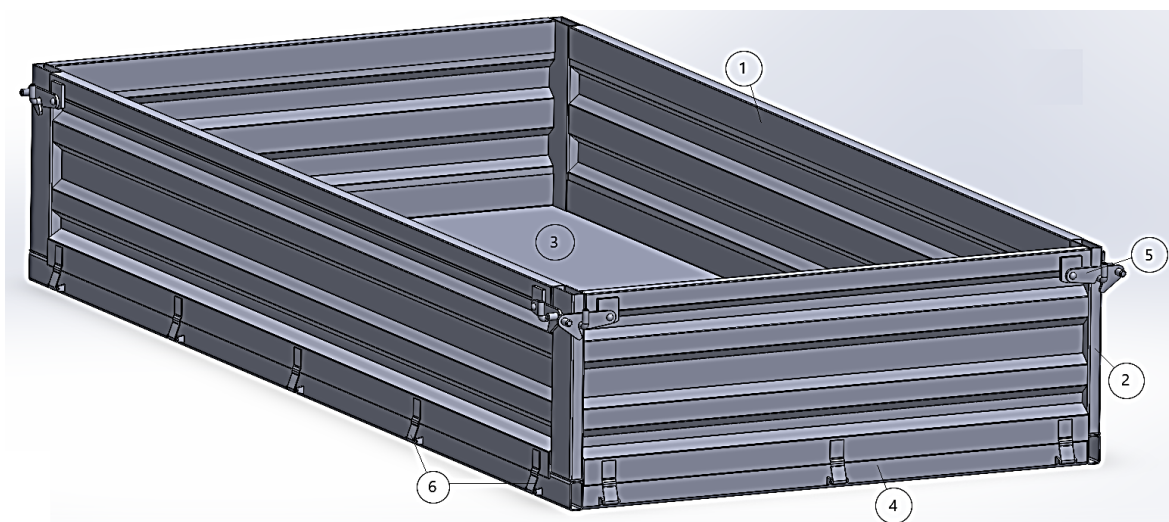


Figura 66 - Caixa de carga

A caixa de carga é assente num *chassis* representado na Figura 67, que a suporta e faz ligação aos eixos das rodas, que não foram incluídos na análise. Esta submontagem é uma versão simplificada, baseada num *chassis* longarina utilizado em semirreboques deste tipo, constituída por longarinas (2) com perfil em C e travessas de perfil retangular (1). A ligação caixa de carga - *chassis* é realizada pelos componentes (3) e (4). O componente (4) solda na caixa e assenta no componente (3), sendo fixo via pino. Uma vista aproximada desta ligação é apresentada na Figura 68.

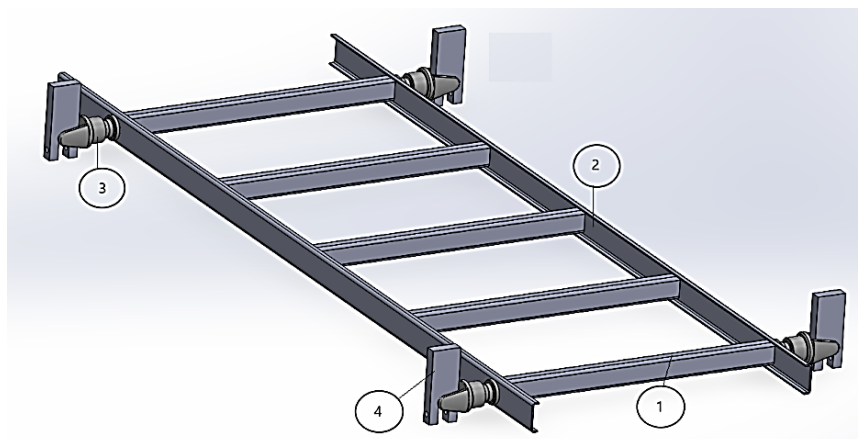


Figura 67 – Componentes do *chassi*

Do *chassis*, apenas o componente (4) não foi retirado ou adaptado de partes do semirreboque fornecido. Este componente foi criado apenas para ligar o *chassis* à caixa de carga.

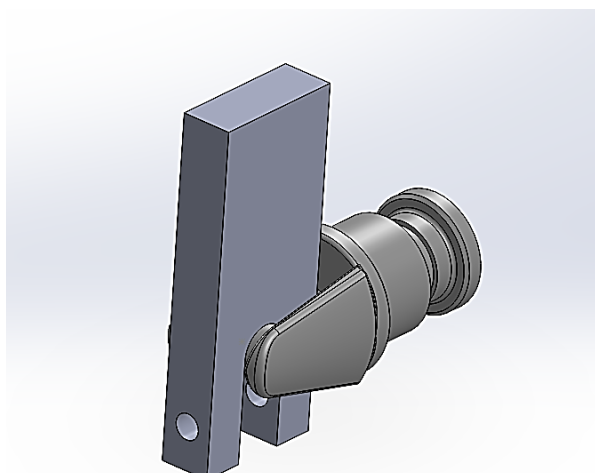


Figura 68 – Vista aproximada da ligação caixa de carga-*chassi*

### Definição das condições de pré processamento do modelo

Antes de se efetuar a definição do material para as situações de simulação de montagem, devem ser verificadas e eliminadas interferências entre componentes. De seguida são definidas as condições de pré processamento do modelo:

- Definição do material para todos os componentes para aço ASTM A36;
- Encastramento nas longarinas (Figura 69);
- Definição de um contacto *bonded* entre elementos de montagem que são soldados aos taipais, e entre outros elementos soldados;

- Definição da interação do tipo *contact* para assegurar a não penetração em elementos não unidos, como por exemplo o perfil, as travessas e a chapa da base;
- Definição de uma ligação tipo pino nas orelhas dos taipais (Figura 70);
- Aplicação uma pressão de 10.000 N/m<sup>2</sup> na base da caixa correspondente ao peso próprio da carga e uma pressão ao longo da altura dos taipais da caixa de 2,5\*H kN/m<sup>2</sup> (Figura 71);
- Malha com número mínimo de oito elementos por círculo e uma taxa de crescimento de 1,4, entre o comprimento máximo e o comprimento mínimo do elemento tetraédrico. Os comprimentos utilizados inicialmente foram os sugeridos por predefinição do programa: tamanho mínimo – 10 mm, tamanho máximo – 200 mm.

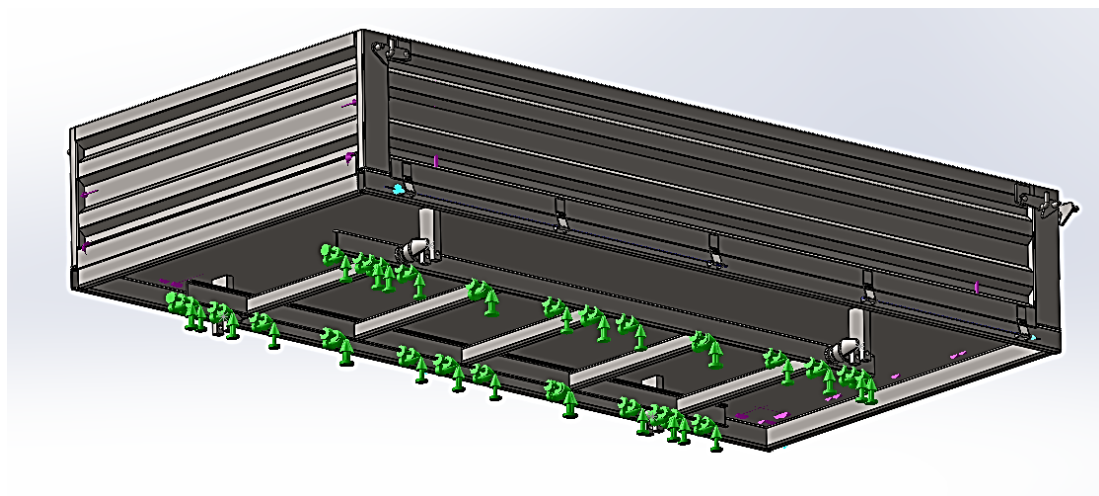


Figura 69 - Aplicação de encastramento nas longarinas

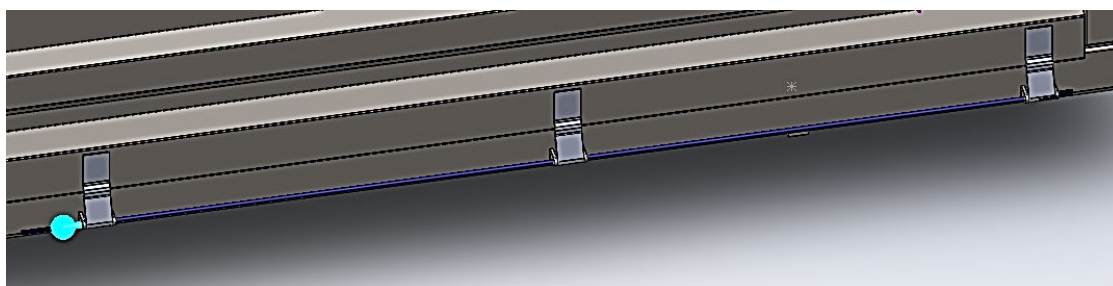


Figura 70 - Ligação do tipo pino nas dobradiças

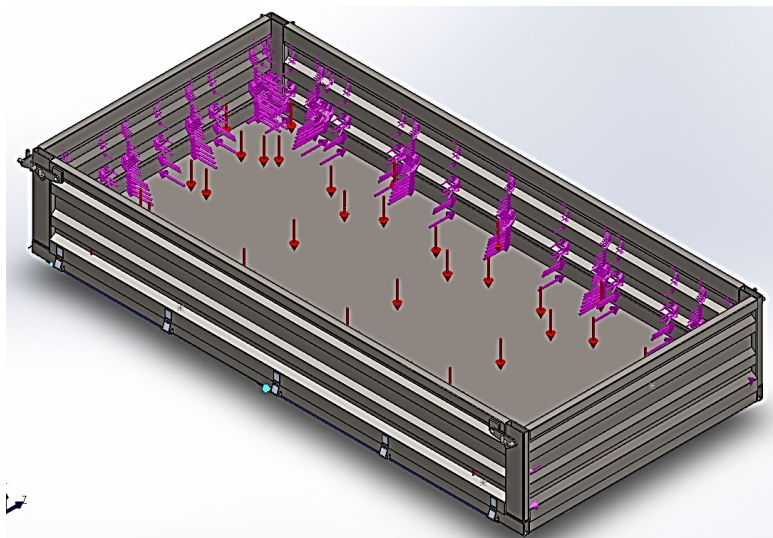


Figura 71 - Definição das cargas no DS Solidworks®

### Estudo de convergência da malha

O estudo da convergência de malha é uma metodologia que permite identificar um tamanho de malha máximo que otimize o tempo do processo, sem comprometer a qualidade dos resultados. Uma malha refinada, com um elevado número de nós, proporciona uma solução precisa. No entanto, devido ao detalhe da malha, a análise consome muito mais tempo e requer um forte poder computacional. Por outro lado, uma malha grosseira não é capaz de obter resultados fidedignos. Por esta razão, geralmente recorre-se a malhas ligeiramente mais grosseiras do que a mais refinada, que apresentem resultados semelhantes, com vista a otimizar os recursos. Para perceber qual o tamanho de malha ótimo, será feito o estudo de convergência da malha mantendo as condições fronteiras indicadas, e estudando os valores da tensão de Von Mises e do deslocamento num ponto em comum.

A malha utilizada é a *blended curvature-based*. As malhas do tipo *curvature-based*, em comparação com a malha *standard*, permitem *multi-core meshing*, sendo mais apropriadas para a análise de peças complexas ou montagens. Uma malha *curvature-based* tem uma maior percentagem de sucesso e eficiência do que a *standard* (Hawk Ridge Systems, 2013). A malha *blended curvature-based* permite que seja aplicado um controlo em componentes que não são críticos, para reduzir o tempo de análise (Solidworks® Help, 2022). Também se verificou que para as mesmas condições, a *blended curvature-based mesh* é mais rápida do que a *curvature-based mesh*.

Os valores de tensão e a deformação apresentados na Tabela 24 do estudo de convergência da malha, foram retirados de um ponto a meio vão da chapa lateral da caixa de carga, como se pode verificar na Figura 72. Os valores de referência são os valores de tensão e deformação da simulação nº1, que possui a malha mais refinada. As malhas com menor desvio estão assinaladas a verde.

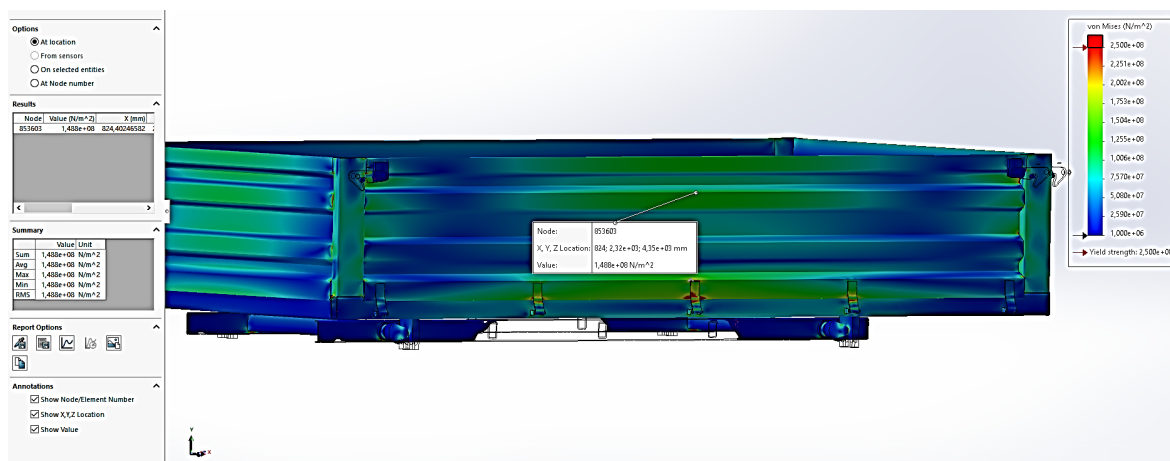


Figura 72 - Ponto utilizado para retirar os dados para comparação

Tabela 24 - Tabela de estudo da convergência da malha

| Simulação nº | Tamanho máximo [mm] | Tamanho mínimo [mm] | Nº elementos | Tensão [MPa] | Desvio absoluto (%) | Deslocamento [mm] | Desvio absoluto (%) |
|--------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 1            | 50                  | 2                   | 2153984      | 147,6        | 0                   | 22,69             | 0                   |
| 2            | 80                  | 4                   | 1124525      | 148,0        | 0,27                | 22,53             | 0,71                |
| 3            | 120                 | 6                   | 744198       | 148,9        | 0,88                | 22,68             | 0,044               |
| 4            | 160                 | 8                   | 427304       | 148,7        | 0,75                | 22,34             | 1,54                |
| 5            | 200                 | 10                  | 356011       | 147,9        | 0,20                | 22,44             | 1,1                 |
| 6            | 240                 | 12                  | 312387       | 148,4        | 0,54                | 22,42             | 1,2                 |
| 7            | 280                 | 14                  | 238030       | 144,5        | 2,1                 | 23,25             | 2,5                 |
| 8            | 320                 | 16                  | 206385       | 138,5        | 6,16                | 24,62             | 8,5                 |
| 9            | 360                 | 18                  | 165155       | 139,7        | 5,35                | 24,14             | 6,39                |
| 10           | 400                 | 20                  | 145009       | 136,6        | 7,45                | 24,22             | 6,74                |

Para o processo de escolha da malha mais apropriada, entendeu-se que o erro relacionado com a deformação e tensão deveriam ter o mesmo peso de decisão. Também, caso duas malhas apresentem resultados bastante similares em relação aos valores da simulação número 1, a que tiver uma malha mais grosseira será utilizada.

Na generalidade, observou-se um aumento do erro com a diminuição do número de elementos. Esta análise é evidenciada de forma gráfica pela Figura 73.

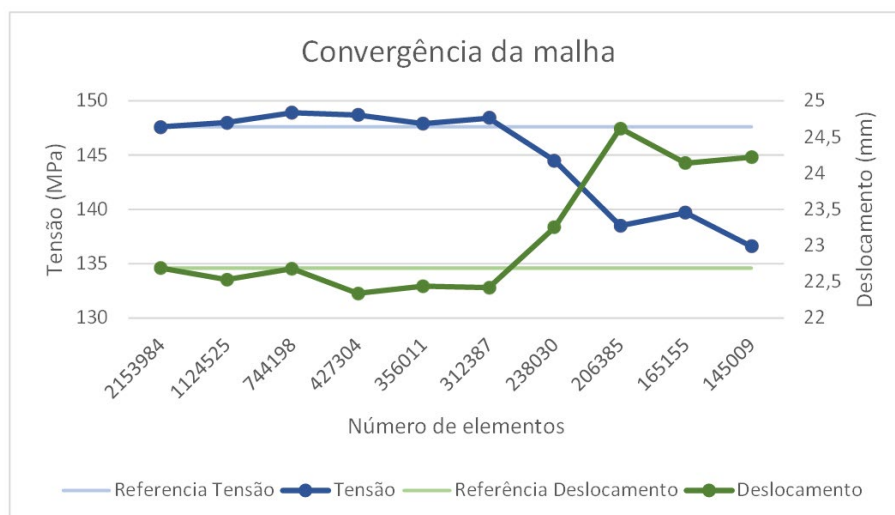


Figura 73 - Estudo de convergência da malha

Pela análise de convergência da malha, é evidente que a partir da simulação nº 5 se inicia a convergência da mesma, partindo da mais grosseira, a nº10. A partir dessa simulação, o erro é cada vez menor e os resultados são bastante próximos. Assim, entende-se que as malhas com menor erro geral foram as malhas das simulações 2 e 5 (assinaladas a verde na Tabela 24), que apresentam resultados similares e, portanto, foi escolhida a malha da simulação 5, para simplificar o problema e reduzir o tempo computacional.

As condições de pré-processamento, em conjunto com a definição da refinação/condições da malha ficam, desta forma, atribuídas para a análise do modelo.

### Análise dos resultados

Os resultados da simulação revelaram que a chapa perfilada não apresenta tensões instaladas acima da tensão de cedência do aço S235 (Figura 76). As tensões máximas na chapa estão sempre instaladas a meio vão do maior taipal, o lateral. No caso deste modelo, este valor é cerca de 180 MPa. Foi possível concluir que a chapa perfilada não é uma boa aproximação da realidade que é a resistência mecânica da caixa de carga como um todo.

As tensões instaladas na dobradiça, visíveis na Figura 74, são superiores à tensão de cedência, o que resulta em deformação permanente. No entanto, a falha deste componente foi desprezada, pelo que nesta fase apenas foi analisado o comportamento da chapa.

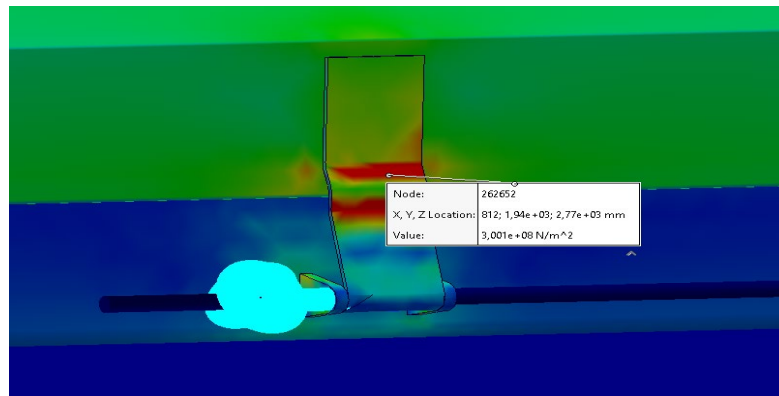


Figura 74 - Tensões instaladas na dobradiça

Um pouco por todo o modelo, aparecem tensões residuais resultados de concentrações de tensões, especialmente nas zonas de fronteira das diferentes peças, como é possível observar na Figura 75. Estes valores foram considerados como desprezáveis.

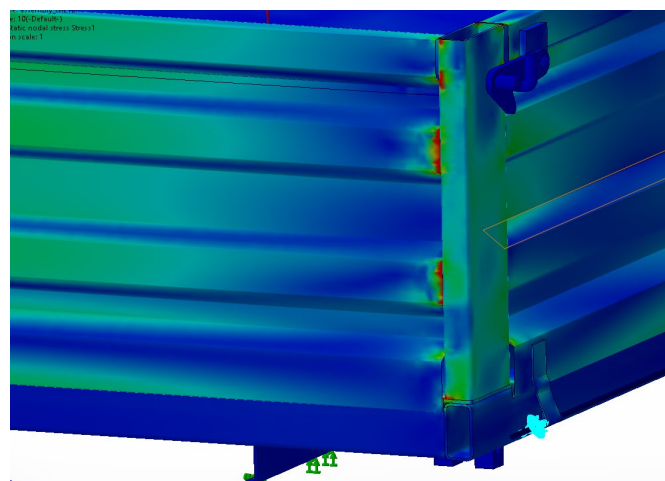


Figura 75 - Exemplo de tensões residuais no modelo

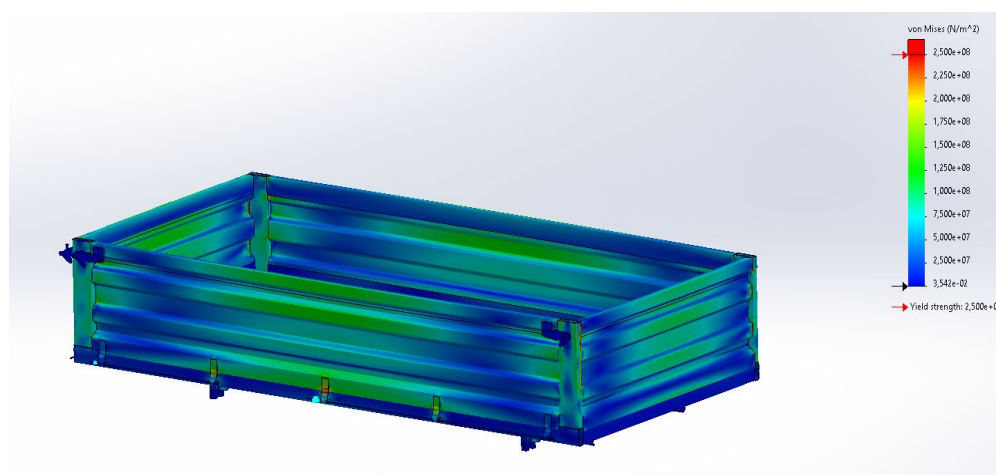


Figura 76 - Distribuição de tensão equivalente Von Mises instalada no modelo

A Figura 77 apresenta a distribuição do fator de segurança da estrutura, limitado a 3. As zonas críticas do modelo, para além das dobradiças, são a meio vão das chapas e apresentam coeficientes de segurança entre 1,3 e 1,8.

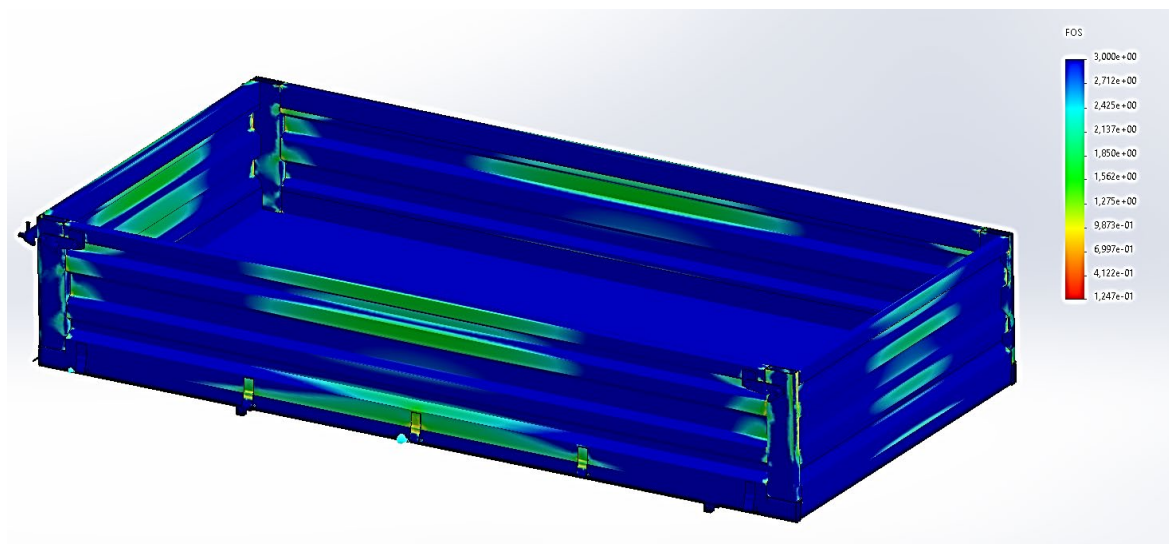


Figura 77 - Distribuição do coeficiente de segurança do modelo

Na questão das deformações, observaram-se valores de pico de cerca de 25 mm, que são considerados aceitáveis.

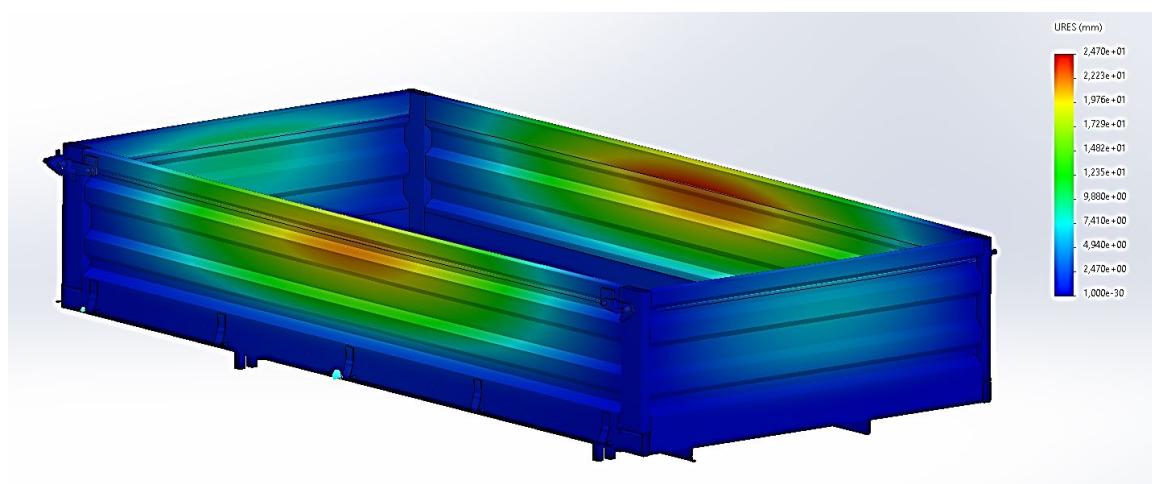


Figura 78 – Distribuição da deformação no modelo

### 6.2.3.3. Análise do taipal Ferpinta

A próxima fase passou pela avaliação da resistência do perfil Ferpinta (Figura 60) para várias condições de carga, e também a análise comparativa com o perfil italiano.

As condições de análises foram as seguintes:

- Condição de deslocamento do semirreboque em curva;
- Condição de sobrecarga;
- Espessura de chapa variável.

### Comparação taipal Ferpinta – taipal italiano

Os resultados de tensão máxima e deformação instalados do perfil italiano e Ferpinta estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Tabela de comparação taipal Ferpinta e italiano

|                              | <b>Tensão<br/>máxima instalada (MPa)</b> | <b>Deslocamento máximo<br/>(mm)</b> | <b>Massa Linear<br/>(kg/m)</b> |
|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Taipal italiano</b>       | 110                                      | 10                                  | 9,5                            |
| <b>Taipal Ferpinta</b>       | 72                                       | 2,8                                 | 10,5                           |
| <b>Variação<br/>relativa</b> | -34,5%                                   | -72%                                | 10,5%                          |

A análise computacional permite entender que ainda que a redução das tensões instaladas seja evidente, comprovando que o taipal Ferpinta é mais resistente aos esforços do que o taipal italiano usado na Herculano, nenhum dos taipais atinge a cedência e, desta forma, nenhuma da deformação presente é de carácter plástico. O peso do taipal Ferpinta é superior ao taipal italiano, aumentando a massa de 9,5 kg/m para 10,5 kg/m, aumento de 10,5%, que representam 8,57 kg de aumento de massa total no S1ET 3x1,6.

### Análise taipal Ferpinta – vários casos de carga

A Tabela 26 apresenta a análise realizada do taipal Ferpinta para 1,5 e 1 mm de espessura, assim como em várias situações críticas como excedente de carga de 20% acima do considerado, e ainda em situação de curva, em que 50% da carga de um dos taipais laterais é transportada para o outro taipal lateral.

Tabela 26 - Análise do taipal Ferpinta para vários casos

|                      | <b>Tensão máxima<br/>instalada (MPa)</b> | <b>Deslocamento máximo<br/>(mm)</b> | <b>Tensão de<br/>cedência<br/>(MPa)</b> | <b>Coefficiente de<br/>segurança</b> |
|----------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Taipal 1,5 mm</b> | 72                                       | 2,8                                 | 270                                     | 3,75                                 |

Tabela 26 - Análise do taipal Ferpinta para vários casos (continuação)

|                                                            | Tensão máxima instalada (MPa) | Deslocamento máximo (mm) | Tensão de cedência (MPa) | Coefficiente de segurança |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Carga deslocada para um taipal (75%)                       | 108,4                         | 4,41                     | 270                      | 2,5                       |
| Excedente de carga (+20%) + Carga deslocada para um taipal | 122                           | 5,2                      | 270                      | 2,21                      |
| Chapa trapezoidal de 1 mm                                  | 126,4                         | 5,6                      | 270                      | 2,14                      |
| Carga deslocada para um taipal (75%)                       | 173,4                         | 8,37                     | 270                      | 1,56                      |

Segundos os resultados apresentados, não se considerada o taipal como sobredimensionado. Caso seja considerada a aplicação de chapa trapezoidal de 1 mm, é de mencionar que esta apresenta um comportamento bastante similar à do perfil italiano com 1,5 mm de espessura, e ainda permite uma redução da massa linear de 9,5 kg/m para 8,5 kg/m. A soldadura da chapa trapezoidal de 1 mm é ainda considerada viável.

### 6.3. Desenvolvimento dos acessórios

O *design* do fecho foi alterado de forma a facilitar o processo de soldadura. As duas soldaduras efetuadas eram de filete e foram alteradas para soldadura de enchimento. O desenho técnico da montagem encontra-se no apêndice A.

A razão da aplicação deste tipo de soldadura é principalmente por razões de acessibilidade, facilidade de operação e compatibilidade com a automação.

### 6.4. Definição dos parâmetros de soldadura

Segundo a especificação AWS A5.18/A5.18M:2005, o material de adição ER70S-6 utilizado é especialmente apropriado para aplicação em chapa fina, onde é desejável um cordão de solda limpo, e é comum o aparecimento de oxidação/corrosão.

O modo de transferência por curto-circuito é o mais indicado para baixas espessuras e, segundo a especificação AWS A5.18/A5.18M:2005, este modo é obtido para diâmetros de eletrodo entre 0,8 e 1,2 mm, com valores baixos de intensidade de corrente e diferença de potencial. Os gases de proteção mais utilizados são misturas de argônio e dióxido de carbono, ou apenas dióxido de carbono, que permite maior penetração. Misturas gasosas contendo argônio entre 50 e 80%, sendo o resto dióxido de carbono, são vantajosas para materiais finos. No entanto, deve ser misturada imediatamente antes do uso, devido à sua instabilidade.

O valor da intensidade de corrente para que se verifique o modo de transferência por curto-circuito deve ser entre os 100 e 200 A, com diferença de potencial entre 14 e 23 V. O fluxo de gás deve estar compreendido entre os 12 e os 17 L/min (Silva, 2016), dependendo do local e condições ambiente onde é normalmente realizada a soldadura.

A Figura 79 apresenta valores de intensidade de corrente – velocidade de alimentação do fio, dependendo do diâmetro do eletrodo de aço ao carbono. Para os valores de intensidade de corrente referidos, a velocidade de alimentação do fio, para fio de 1,2 mm, deve-se situar entre 4 e 6 m/min. A Tabela 27 apresenta, de forma geral, os valores dos parâmetros mais indicados para a aplicação.

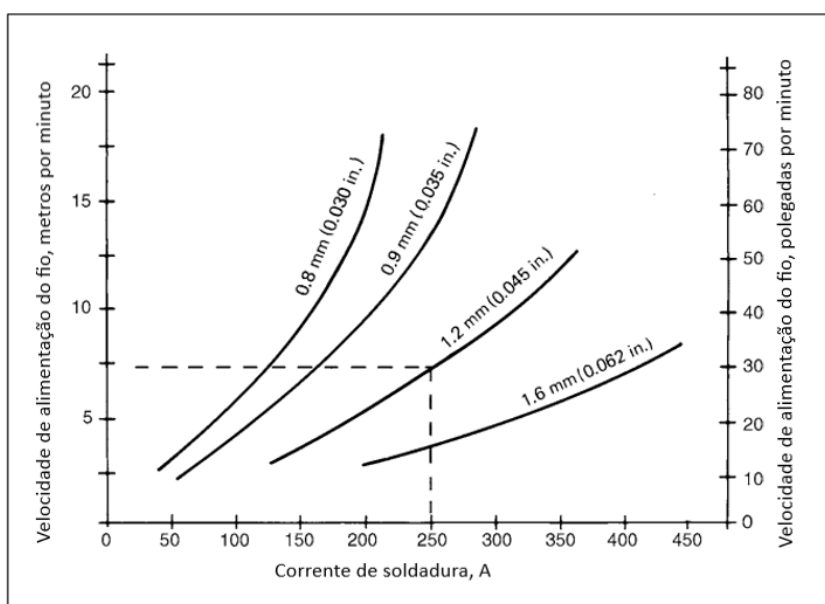


Figura 79 – Corrente típica – velocidade de alimentação do fio (Adaptado de: O'Brien, 2004)

Tabela 27 - Valores dos parâmetros adequados

| Parâmetro                        | Valor                              |
|----------------------------------|------------------------------------|
| Intensidade de corrente          | 100-200 A                          |
| Diferença de potencial           | 14-23 V                            |
| Velocidade de alimentação do fio | 3-7 m/min                          |
| Fluxo de gás                     | 12-17 L/min                        |
| Material de adição               | EUROTRON M/SG 2                    |
| Gás de proteção                  | 50-80% Ar e 50-20% CO <sub>2</sub> |

Os valores indicados na Tabela 12 foram revistos em conformidade com a análise realizada, assim como as indicações da Figura 80.

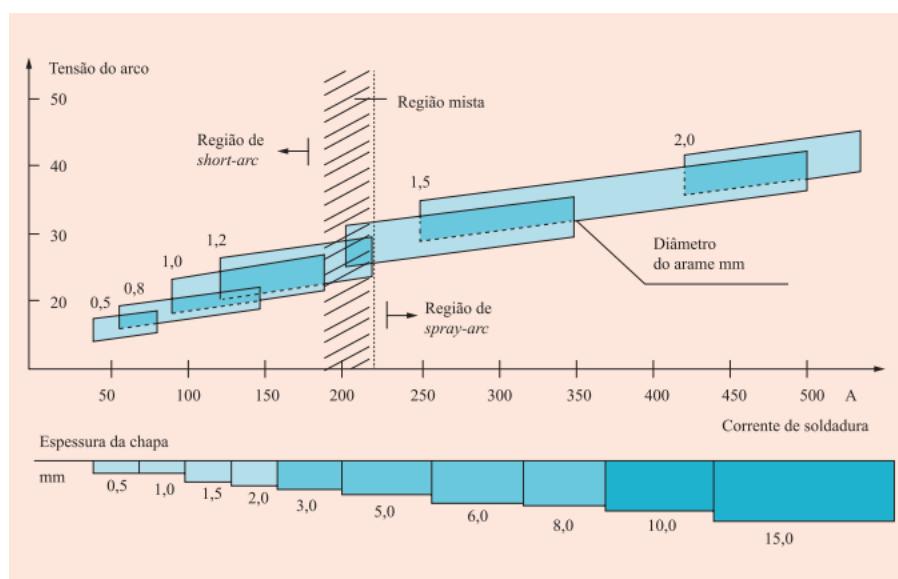


Figura 80 - Zonas típicas para cada modo de transferência em função da espessura do material de base e da intensidade de corrente (Retirado de: Silva, 2014)

Foram sugeridos na Tabela 28 novos valores para os parâmetros de soldadura a utilizar para os diversos componentes.

Tabela 28 – Sugestão de valores a utilizar para cada componente

| Parâmetro/Componente                     | Fecho                                    | Fueiro  | Dobradiça traseira | Chapa trapezoidal |
|------------------------------------------|------------------------------------------|---------|--------------------|-------------------|
| Espessura do componente (mm)             | 8                                        | 2       | 5                  | 1,5               |
| Diâmetro do fio (mm)                     | 1,6                                      | 1       | 1,2                | 1                 |
| Intensidade de corrente (A)              | 330-340                                  | 120-130 | 210-220            | 95-105            |
| Diferença de potencial (V)               | 31-33                                    | 20-22   | 26-28              | 19-21             |
| Velocidade de alimentação do fio (m/min) | 6-7                                      | 6-7     | 7-8                | 3-4               |
| Fluxo de gás (L/min)                     | 12-17                                    |         |                    |                   |
| Material de adição                       | EUROTROD M/SG 2                          |         |                    |                   |
| Gás de proteção                          | SANARC 15 – 85% CO <sub>2</sub> e 15% Ar |         |                    |                   |

Componentes como o fecho eram soldados com um diâmetro de fio não indicado. Os defeitos identificados no fecho eram maioritariamente assimetria do cordão, cratera no final do cordão e porosidade à superfície. Estes defeitos podem ser minimizados com a redução do fluxo de gás, intensidade da corrente, diferença de potencial e velocidade de alimentação do fio. No entanto, o aumento do diâmetro do fio implica o aumento da intensidade de corrente e diferença de potencial.

No caso do fueiro, este é soldado com um diâmetro de fio adequado, no entanto, a pesquisa sugere um pequeno aumento da intensidade da corrente. Em termos de defeitos, apresentava salpicos e

crateras no fim do cordão. A resolução deste problema passa pela redução da intensidade de corrente.

O cordão do fueiro não é visível para os clientes, pelo que os salpicos, como não apresentam nenhum problema na aplicação, a não ser estético, é preferível dar-se o aumento da intensidade da corrente para agir em conformidade com a pesquisa.

A dobradiça traseira era soldada com fio de diâmetro insuficiente, pelo que é sugerido que seja aumentado o diâmetro do fio e ajustados os parâmetros. Na questão dos defeitos, as crateras visíveis neste componente são mínimas, mas que são provavelmente o resultado da tentativa de evitar a sobreposição entre a soldadura final e inicial.

### **Indicações de soldadura no desenho técnico**

Relativamente às indicações de soldadura no desenho do taipal (Figura 83), segundo o Eurocódigo 3, parte 1-3, para peças com menos de 4 mm, o dimensionamento do cordão é dado apenas ao garantir que o cordão possui, no mínimo, a garganta igual à espessura da chapa, e que o valor da tensão de cedência do material de adição seja igual ou maior do que a tensão de cedência do material base. Desta forma, para o taipal é necessário, no mínimo, uma garganta de 1,5 mm, considerando uma espessura de chapa de 1,5 mm, e o material de adição referido na Figura 40.

O Eurocódigo 3, parte 1-8, indica que a espessura da soldadura de enchimento deve ser, no mínimo, igual à espessura do material base, até uma espessura de 16 mm. Desta forma para a soldadura do fecho (Figura 84) deve ser cumprido a espessura do cordão de 8 mm.

## 6.5. Protótipo

Na Figura 81 e Figura 82 deste subcapítulo é visível o protótipo fabricado na Herculano. O material do perfil trapezoidal utilizado é o aço DX51D, enquanto o material do perfil FT é o aço S235.



Figura 81 – Vista traseira do Protótipo

Exceccionalmente, o perfil trapezoidal foi cortado na Herculano. O perfil foi cortado à medida para garantir os 500 mm de altura, em conjunto com os dois perfis FT, cortada ao comprimento para os taipais laterais, frontal e traseiro e, finalmente, efetuada a dobra. Houve, também, cuidado acrescido quando efetuado o processo de ligação soldada, devido à espessura reduzida da chapa trapezoidal.



Figura 82 - Vista lateral do protótipo

## 6.6. Análise crítica da solução desenvolvida

O perfil desenvolvido permite a obtenção das seguintes vantagens, em relação ao produto fabricado até ao momento pela Herculano:

- Redução das tensões instaladas, segundo os resultados das simulações;
- Possibilidade de redução da espessura do perfil, mantendo a resistência mecânica;
- Perfil fabricado por uma empresa do grupo, a Ferpinta;
- Poupança no que diz respeito à logística associada;
- Utilização da perfiladora com baixo aproveitamento na Ferpinta.

No que diz respeito às desvantagens:

- Custos associados à necessidade de alteração do equipamento;
- Etapa extra de soldadura.

Apesar da falta de experiência em termos contínuos da aplicação deste modelo, prevê-se redução nos defeitos de soldadura com a aplicação dos novos parâmetros de soldadura, assim como a necessidade de um novo *design* do fecho.

### **6.6.1. Análise financeira**

A chapa perfilada utilizada pela Herculano, o perfil Italiano (Figura 33), é encomendada em Itália e o seu envio para a Herculano tem um custo associado de 2500 € por cada encomenda. A aplicação da solução desenvolvida deverá permitir uma redução de custo no fabrico dos semirreboques S1ET, considerando os custos associados às modificações necessárias que devem ser aplicadas à perfiladora da Ferpinta para produzir o produto.



## 7. CONCLUSÕES

### 7.1. Contributos pessoais e para a empresa

O principal objetivo desta dissertação foi o desenvolvimento de uma nova linha de taipais. Os objetivos inerentes a este trabalho foram a integração da soldadura robotizada e da perfilagem. A Herculano tinha problemas com a soldadura robotizada do perfil italiano usado, que é caracterizado por várias ondulações. Um dos primeiros objetivos foi aproximar a solução aos perfis utilizados na concorrência, que possuem menos ondulações, facilitando o processo de soldadura robotizada. A solução desenvolvida utiliza um perfil já existente na Ferpinta, cumprindo o objetivo estipulado de utilização interna do processo de perfilagem, sendo que a perfiladora da Ferpinta possui um grau de utilização perfeitamente adequado à inserção de mais este modelo de chapa perfilada sem que o fluxo produtivo normal seja afetado.

A análise computacional mostra que a solução desenvolvida consegue obter redução de tensões e deformações instaladas. Em concreto, uma redução das tensões máximas no valor de 34,5% e uma redução da deformação máxima em 72%. No entanto, apresenta um aumento da massa linear de 10,5%. A aplicação da solução desenvolvida com 1 mm de espessura possui, praticamente, a mesma resistência mecânica do perfil italiano usado na Herculano com 1,5 mm de espessura, que permite uma redução da massa linear em 10,5%.

A análise de defeitos de soldaduras efetuadas no *robot* de alguns dos acessórios utilizados no semirreboque, revelaram uma alta percentagem de defeitos. O fecho apresentou a maior probabilidade de rejeição, pelo que foi desenvolvido um novo *design* de montagem para facilitar o processo de soldadura robotizado. A soldadura de filete foi substituída por soldadura de enchimento, permitindo melhor acessibilidade, facilidade de operação e compatibilidade com a automação. Foi efetuado o ajuste dos parâmetros de soldadura de vários acessórios para o novo perfil.

Finalmente, a solução obtida permite obter uma poupança de 2500 € por cada encomenda que é efetuada pela Herculano de chapa perfilada italiana. Adicionalmente, existem grandes vantagens na compra da chapa perfilada à Ferpinta, sendo que a Herculano é uma filial desta. Na Tabela 29 é possível verificar o cumprimento dos objetivos estipulados.

Tabela 29 – Cumprimentos dos objetivos

| Cumprimento dos objetivos                                                                                           |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Implementação da perfilagem                                                                                         | ✓ |
| Implementação da soldadura robotizada                                                                               | X |
| Estudo de diferentes materiais e processos de fabrico                                                               | ✓ |
| Mudança de perfil para um mais retilíneo, evitando ondulações para facilitar o processo de soldadura robotizada MAG | ✓ |
| Estudo de um novo material de adição                                                                                | ✓ |

Tabela 29 – Cumprimentos dos objetivos estipulados (continuação)

| Cumprimento dos objetivos                                                                                                                                                                         |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Atribuição de diferentes materiais para a chapa perfilada, dependendo das dimensões do semirreboque                                                                                               | X |
| Remoção de componentes de produção inconsistente e substituição por um novo <i>design</i> simples, ou por peças de fabricantes externos                                                           | ✓ |
| Avaliação do processo de soldadura, identificando defeitos e erros no processo, e possivelmente a redefinição dos parâmetros do processo                                                          | ✓ |
| Alteração do fabrico dos semirreboques, de tal forma que qualquer componente opcional que o cliente escolha colocar no produto, esta possa ser introduzida pós pintura, uniformizando o processo. | X |

## 7.2. Trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem estender a componente computacional com estudos não lineares. O modelo pode, também, ser validado através de testes reais e verificação de tensões e deformações com o uso de extensometria elétrica.

A análise financeira da implementação do perfil desenvolvido deverá ser efetuada de forma mais detalhada, analisando a quantidade de chapa perfilada que é utilizada e os custos associados às mudanças nos equipamentos necessários.

É importante que o novo *design* do fecho, assim como as alterações dos parâmetros de soldadura sejam testados e uma nova análise de defeitos seja efetuada. Seria também importante o desenvolvimento de novos *gabarits*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kuechler, W., & Vaishnavi, V. (2012). A framework for theory development in design science \research: Multiple perspectives. *Journal of the Association for Information Systems*, 13(6), 395–423. <https://doi.org/10.17705/1jais.00300>
- Praburaj, L. (2018). Role of Agriculture in the Economic Development of a Country. *Shanlax International Journal of Commerce*, 6(3), 1–5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1323056>
- Utvik, K., Colantonio, M., Gengler, C., Begolli, A., & da Silva, M. (2019). Agriculture, Forestry and fishery statistic. <https://doi.org/10.2785/743056>.
- Ana Serra, Ricardo Garcia. Qual é o peso da agricultura e das florestas no PIB? Pordata. <https://www.pordata.pt/publicacoes/infografias/qual+e+o+peso+da+agricultura+e+das+florestas+no+pi+-296> - Acedido a 7 Outubro 2022
- Pordata. Emprego na agricultura por 100 mil habitantes. Pordata. <https://www.pordata.pt/europa/emprego+na+agricultura+por+100+mil+habitantes-3704>. - Acedido a 7 Outubro 2022
- Kuo, T., Huang, S. & Zhang, H. (2001). Design for manufacture and design for 'X': Concepts, applications, and perspectives. *Computers and Industrial Engineering*. 41. 241-260 [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00045-6)
- Mesa, J. A. (2023). Design for circularity and durability: an integrated approach from DFX guidelines. *Research in Engineering Design*. <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00419-1>
- Marinelli, M. (2022). A DfX-based approach for incorporating sustainability in infrastructure project planning. *Built Environment Project and Asset Management*, 12(1), 20–37. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-05-2020-0083>
- Favi, C., Campi, F., Germani, M., & Mandolini, M. (2022). Engineering knowledge formalization and proposition for informatics development towards a CAD-integrated DfX system for product design. *Advanced Engineering Informatics*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101537>
- Atilano, L., Martinho, A., Silva, M. A., & Baptista, A. J. (2019). Lean Design-for-X: Case study of a new design framework applied to an adaptive robot gripper development process. *Procedia CIRP*, 84, 667–672. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.190>
- Baptista, A. J., Peixoto, D., Ferreira, A. D., & Pereira, J. P. (2018). Lean Design-for-X Methodology: Integrating Modular Design, Structural Optimization and Ecodesign in a Machine Tool Case Study. *Procedia CIRP*, 69, 722–727. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.003>
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection*. New York: John Wiley & Sons ISBN N 0-471-35924-6
- Swift K G, & Booker J D. (2003). *Process Selection – From design to manufacture*. Butterworth-Heinemann. ISBN 0 7506 5437
- Ashby, M. F. (2011). *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*. Elsevier. ISBN 978-85-352-4521-9

- Antony, J. (2006). Six sigma for service processes. *Business Process Management Journal*, 12(2), 234–248. <https://doi.org/10.1108/14637150610657558>
- Guleria, P., Pathania, A., Sharma, S., & Sá, J. C. (2021). Lean six-sigma implementation in an automobile axle manufacturing industry: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1739–1746. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.177>
- Ferreira, C., Sá, J. C., Ferreira, L. P., Lopes, M. P., Pereira, T., & Silva, F. J. G. (2019). iLeanDMAIC–A methodology for implementing the lean tools. *Procedia Manufacturing*, 41, 1095–1102.
- Costa, T., Silva, F. J. G., & Pinto Ferreira, L. (2017). Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology. *Procedia Manufacturing*, 13, 1104–1111. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.171>
- Barbosa, B., Pereira, M. T., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2017). Solving Quality Problems in Tyre Production Preparation Process: A Practical Approach. *Procedia Manufacturing*, 11, 1239–1246. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.250>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Hevner, A., & Park, J. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28, 75–105.
- Takeda, H., Veerkamp, P., Tomiyama, T., & Yoshikawa, H. (1990). Modeling Design Processes. *AI Magazine*, 11(4), 37–48
- Kao, H. Y., Yu, M. C., Masud, M., Wu, W. H., Chen, L. J., & Wu, Y. C. J. (2016). Design and evaluation of hospital-based business intelligence system (HBIS): A foundation for design science research methodology. *Computers in Human Behavior*, 62, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.04.021>
- Eiras, E. (2022). Desenvolvimento de novo conceito de equipamento automático para fabrico de cabos de comando para automóveis.
- Gaspar, M., Silva, F. J. G., Pinto, A. G., & Campilho, R. D. S. G. (2023). 2D and 3D Wires Formability for Car Seats: A Novel Full-Automatic Equipment Concept towards High Productivity and Flexibility. *Machines*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/machines11030410>
- Eiras, E., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Sales-Contini, R. C. M., Pe-4 Droso, A. F. v., & Sebbe, N. P. v. (2021). A novel full-automatic concept to produce Bowden cables first 2 subset improving productivity, flexibility, and safety. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
- Tojal, M. C., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. G., & Ferreira, L. P. (2022). Case-Based Product Development of a High-Pressure Die Casting Injection Subset Using Design Science Research. *FME Transactions*, 50(1), 32–44. <https://doi.org/10.5937/fme2201032T>
- Oruç, S., Eren, P. E., & Koçyiğit, A. (2022). A constraint programming model for making recommendations in personal process management: A design science research approach. *Decision Support Systems*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113665>
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, H. & Mazurek, D. (2011). *Mecânica dos materiais*. Porto Alegre: AMGH. ISBN 0-07-352938-9 / 978-0-07-352938-7

- Weber, R. P. (2012). Earth Pressure and Retaining Wall Basics for Non-Geotechnical Engineers Course Content.
- Watkins, R., Keil, B., Mielke, R., & Rahman, S. (2010). Pipe zone bedding and backfill: A flexible pipe perspective. *Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability - Renew, Rehab, and Reinvest - Proc. of the Pipelines 2010 Conference*, 386, 426–438. [https://doi.org/10.1061/41138\(386\)42](https://doi.org/10.1061/41138(386)42)
- Silva, F. J. G. (2016). *Tecnologia de soldadura - Uma abordagem técnico-didática*. Publindústria. ISBN 978-989-723-062-2
- Dores De Castro, M. J. (2011). *Licenciatura em Engenharia Mecânica Automóvel - Processos de Fabrico: Soldadura*. ISEP
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R., Teknologi, U., Prentice, M., Singapore, H., New, L., Toronto, Y., Tokyo, S., Mexico, M., Munich, C., Capetown, P., & Kong Montreal, H. (2009). *Manufacturing engineering and technology sixth edition*. Pearson.
- American Welding Society., O'Brien, Annette., & American Welding Society. Welding Handbook Committee. (2004). *Welding handbook. Volume 2, Welding processes. Part 1*. American Welding Society
- Srinivasan, D., Sevel, P., John Solomon, I., & Tanushkumaar, P. (2022). A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding. *Materials Today: Proceedings*, 64, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016>
- Katayama, S. (2013). *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-877-1
- Weman, K. (2012). *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-518-3
- Norrish, J. (2006). *Advanced welding processes*. Woodhead Publishing. ISBN-13: 978-1-84569-130-1
- Beddoes, J., Bibby, M. J. (1999). *Principles of metal manufacturing processes*. Butterworth-Heinemann. ISBN 0 340 73162 1
- Halmos, G. (2006). *Roll Forming Handbook*. CRC Press. ISBN 0-8247-9563-6
- Altan, T., & Tekkaya, A. E. (2012). *Sheet Metal Forming – Processes and Applications*. ASM International. ISBN-13: 978-1-61503-844-2
- ADH. (2023). Press Brake Insights: Structure and Components Revealed. <https://www.adhmt.com/press-brake-structure-and-components/>. Acedido a 17 de Outubro
- Shivegowda, M. D., Boonyasopon, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022). A Review on Computer-Aided Design and Manufacturing Processes in Design and Architecture. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 29, Issue 6, pp. 3973–3980). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09723-w>
- Rao, M. A., Khanna, M. R., Somaiya, K. J., & Gangopadhyay, M. (). *Applications of Finite Elements Method (FEM) - an overview*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36294.42565>

- Electroportugal. Produtos. <http://www.electroportugal.com/index.php?id=27>. Acedido a 26 Maio de 2023
- Ashby, M. F. (1999). Materials selection in mechanical design. Butterworth-Heinemann. ISBN 0750643579
- BSI Standards Publication (2014). Welding-Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)-Quality levels for imperfections.
- British Standards Institution. (2010). Welding and allied processes: classification of geometric imperfections in metallic materials. Part 1. Fusion welding. British Standards Institution.
- Fonseca, E. (2022). Dimensionamento de ligações soldadas e aparafusadas. Mestrado em Engenharia Mecânica, Construções Mecânicas - Construções Metálicas. ISEP
- Italautocar. Products. <http://www.italautocar.com/en/products.html>. Acedido a 12 de Novembro de 2022
- Gürel, E. (2017). SWOT analysis: a theoretical review. Journal of International Social Research, 10(51), 994–1006. <https://doi.org/10.17719/jisr.2017.1832>
- Transparent Market Research. (2021). Agricultural Trailer Market. Transparent Market Research. <https://www.transparencymarketresearch.com/agricultural-trailer-market.html>. Acedido a 14 de Março de 2023
- Silva, F. J. G. (2012). Metalurgia da Soldadura. Mestrado em Engenharia Mecânica, Construções Mecânicas – Processos de Ligação. ISEP
- Silva, F. J. G. (2018). Soldabilidade dos Aços. Mestrado em Engenharia Mecânica, Construções Mecânicas – Processos de Ligação. ISEP
- Silva, F. J. G. (2018). Soldabilidade dos Aços inoxidáveis. Mestrado em Engenharia Mecânica, Construções Mecânicas – Processos de Ligação. ISEP
- Silva, F. J. G. (2018). Soldabilidade do Alumínio. Mestrado em Engenharia Mecânica, Construções Mecânicas – Processos de Ligação. ISEP
- AWS. (1982). Welding Handbook. Metals and Their Weldability. Seventh Edition, Volume 4. AWS.
- Modenesi, J. (2008). Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
- Solidworks® Help. (2022). Blended Curvature-Based Mesher. [https://help.solidworks.com/2022/English/WhatsNew/HelpViewerDS.aspx?version=2022&prod=WhatsNew&lang=English&path=c\\_wn2022\\_simulation\\_bcb\\_mesher.htm](https://help.solidworks.com/2022/English/WhatsNew/HelpViewerDS.aspx?version=2022&prod=WhatsNew&lang=English&path=c_wn2022_simulation_bcb_mesher.htm). Acedido a 18 de Dezembro de 2022
- Hawk Ridge Systems. (2013). Curvature based Mesh Advantages in solidworks Simulation. <https://hawkridgesys.com/blog/curvature-based-mesh-advantages>. Acedido a 18 de Dezembro de 2022
- American Welding Society. (2005). Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. American Welding Society

Ferpinta. (2023). Perfis Especiais.

<https://www.ferpinta.pt/download.php?ft=19&l=en&key=fcd4475cd48335e59a9f1bfa3ae3c70>.

Acedido a 13 de Abril

Ferpinta. (2023). Chapas em Formatos. <https://ferro.pt/public/uploads/2018/10/Catalogo-Tecnico-Ferro-v.1.0.0-Chapa-em-Formatos.pdf>. Acedido a 13 de Abril

EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. (2010).

EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. (2006).



## APÊNDICE A

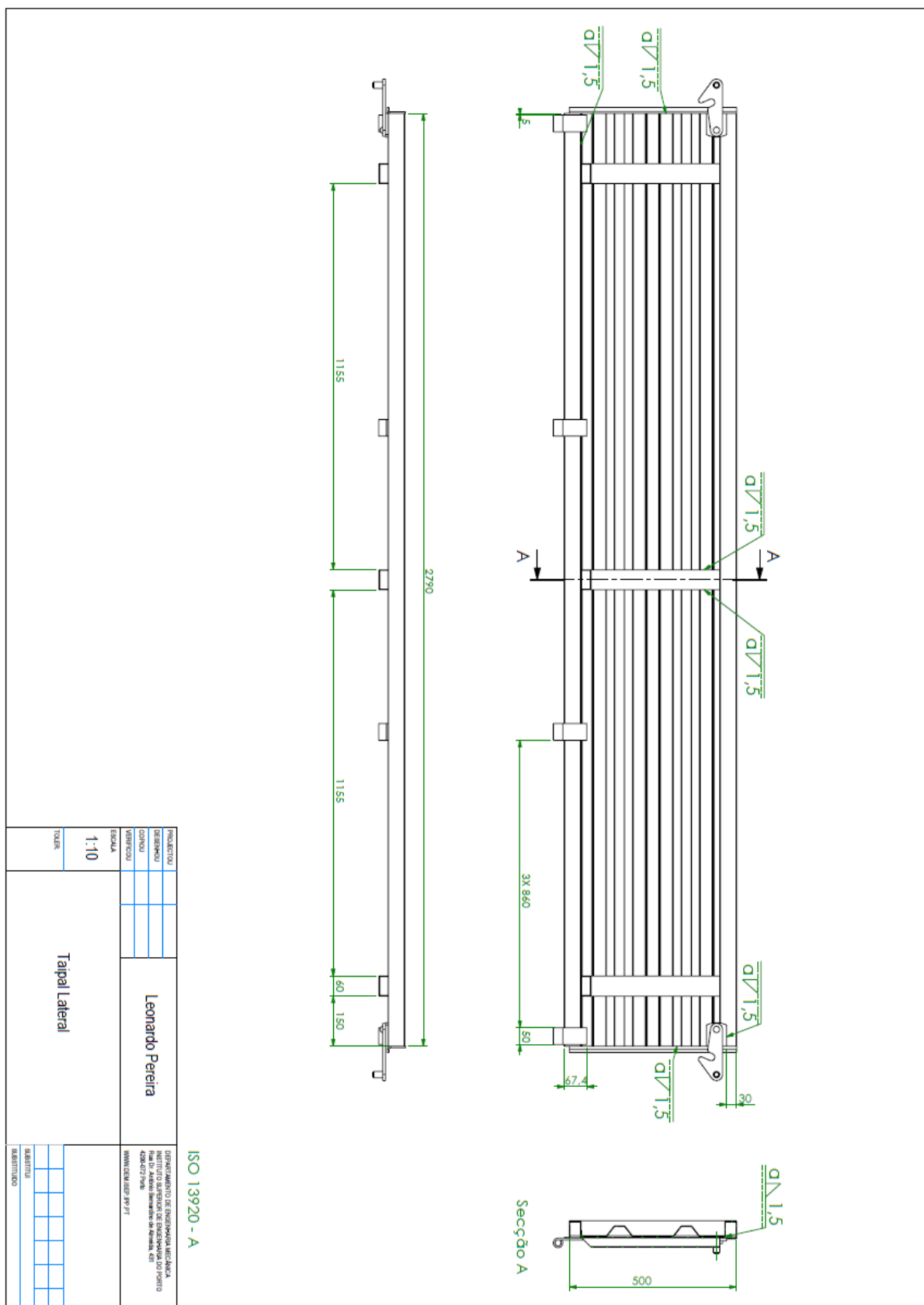


Figura 83 - Desenho técnico da montagem do taipal lateral

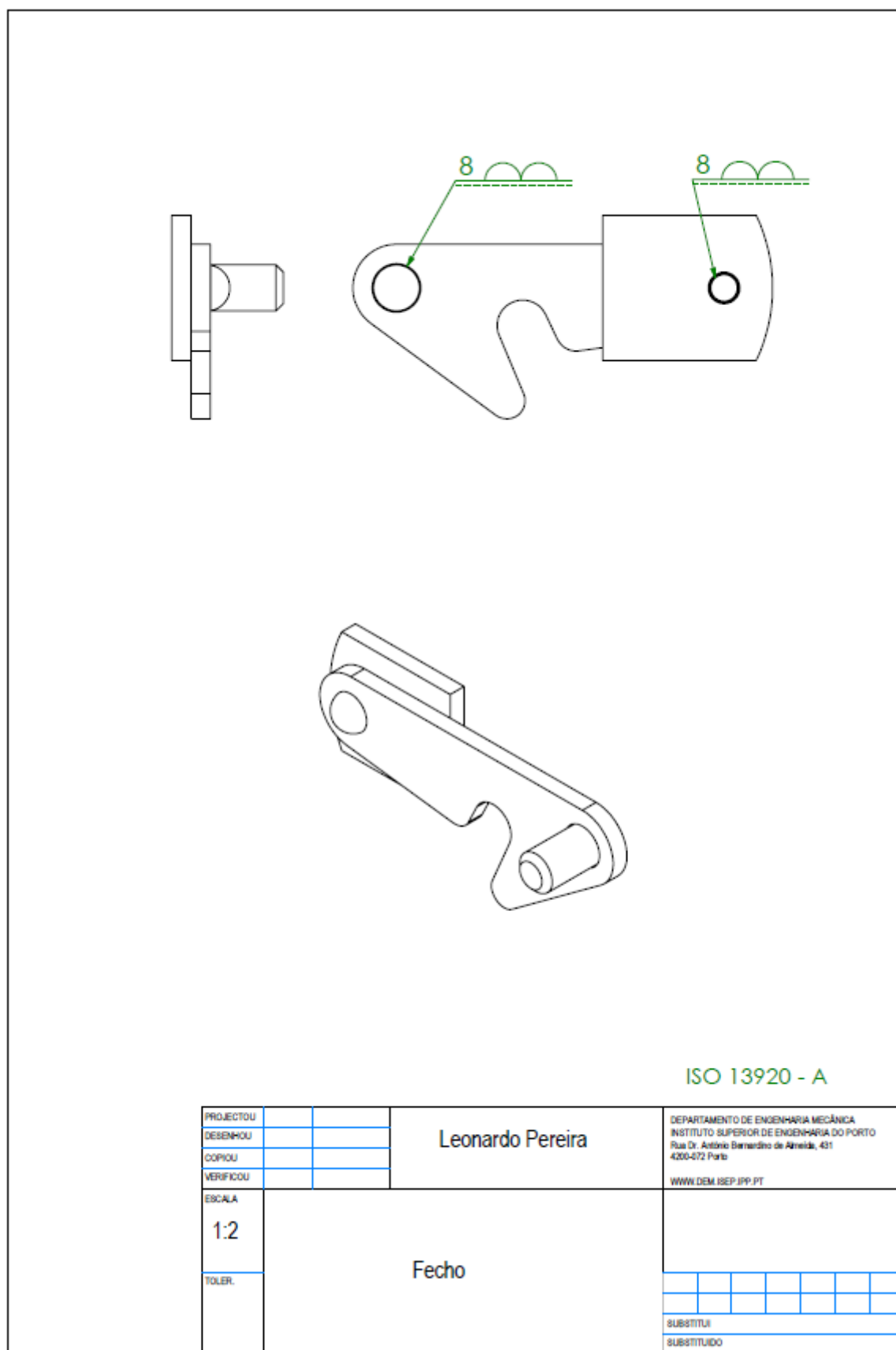


Figura 84 - Desenho técnico da montagem do fecho

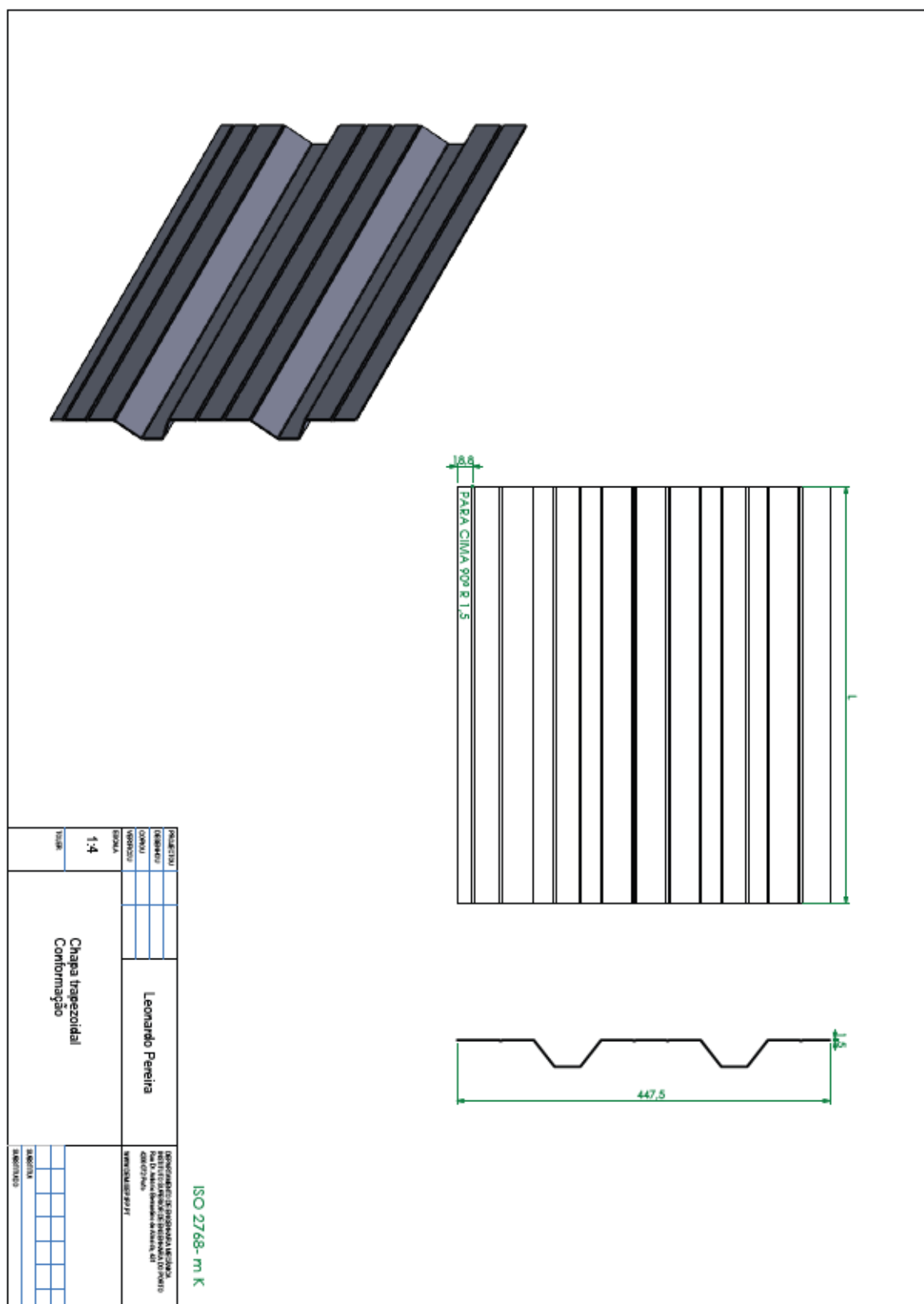


Figura 85 - Desenho técnico para processo da chapa trapezoidal



## ANEXO A