

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mariana Vale Cardoso Rodrigues do Souto

Otimização energética num processo de soldadura por resistência



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mariana Vale Cardoso Rodrigues do Souto

Otimização energética num processo de soldadura por resistência

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:
Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Joaquim Barbosa em primeiro lugar por ter aceite o convite, num ano que reservara para sabática. Pela disponibilidade e paciência. Pela facilidade de comunicação. À Gestamp Cerveira, por ter facultado os recursos e condições para o desenvolvimento do projeto desta dissertação. Pelos valores de cooperação que levaram a que nunca me fosse negada ajuda ou colaboração. Pela familiaridade que tornou fácil a transição do meio académico para o laboral. Ao Diretor do Departamento de Qualidade, Eng. António Azevedo, pela acessibilidade. Por me dar margem para errar e fomentar a aprendizagem em todos os âmbitos disciplinares. Ao meu orientador na Gestamp Cerveira, responsável pelo Laboratório de Qualidade, Nuno Couto, por nunca me deixar desamparada, por me inculir boas práticas de método e organização sem as quais não teria conseguido dar rumo a este projeto. Ao meu informal formador, Eng. Hélder Alves. Por nada em particular.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I hereby declare that I have acted with integrity in the preparation of this academic work and confirm that I have not resorted to the practice of plagiarism or any form of misuse or falsification of information or results in any of the stages leading to its preparation. I further declare that I know and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, outubro de 2022

RESUMO

Perante a mudança do paradigma ambiental e a crescente necessidade de redução das emissões de carbono, surge a necessidade de otimizar a eficiência energética dos processos industriais de maneira a utilizar apenas a energia necessária para que o produto cumpra com os objetivos de qualidade estipulados pelo cliente. Neste âmbito, surge o projeto em torno do qual se desenvolve a presente dissertação.

O caso de estudo diz respeito a um processo de soldadura por resistência no qual a média de resultados obtidos nos ensaios destrutivos (ensaios de tração) é significativamente superior ao objetivo definido pelo cliente. Desta forma, pretende-se reduzir o sobredimensionamento dos parâmetros do processo sem comprometer a qualidade do produto.

Face ao objetivo de reduzir o referido consumo energético, assegurando a qualidade do produto, surge como prioridade a necessidade de estabilizar a grande variabilidade de resultados obtidos nos ensaios de tração. Para tal, numa fase inicial, foi realizado um levantamento de dados no qual se definiram as variáveis influentes no processo de soldadura em estudo e quais das referidas variáveis poderiam ser manipuladas de modo a lograr o objetivo. Adicionalmente, mediu-se o consumo energético (kWh/peça) na máquina nas condições iniciais de funcionamento. Numa segunda fase, procedeu-se à manipulação de parâmetros, iterativamente, de modo a obter um processo estável com resultados satisfatórios de qualidade do produto. Finalmente, efetuou-se uma monitorização do processo otimizado e uma segunda medição do consumo energético da máquina (em kWh/peça), onde se verificou um ganho energético de 12 Wh/peça, equivalente a um ganho anual de 3 MWh de acordo com as previsões de consumo da referência para 2022.

PALAVRAS-CHAVE

SOLDADURA POR RESISTÊNCIA, OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA; QUALIDADE DE SOLDADURA; PARÂMETROS E SOLDADURA.

ABSTRACT

Towards the changes in the environmental paradigm and the growing necessity of reducing the carbon emissions, it is necessary to optimize the energy efficiency of the industrial processes in order to use the minimum energy that accomplishes the requirements for the product. In this context, arises the project around which this dissertation is developed.

The study case concerns a process of Resistance Spot Welding in which the average value obtained in the destructive tests (tensile tests) is largely superior to the minimum demanded by the client. Being so, it is intended to reduce the over-dimensioned parameters of the process without compromising the product quality.

Towards the aim to reduce the referred energy consumption assuring the quality of the product, firstly, there's the need to stabilize the major variety of results obtained in the tensile tests. In this sense, in an initial approach, it was made a data collection in which were defined all the variables with influence in the welding process and, additionally, the ones that could be manipulated in order to obtain the goal of the project. It was also measured the initial energy consumption (kWh/ part) of the welding machine in its initial conditions. The second phase, associated with the design of experiments, consisted in the manipulation of the welding parameters, according to the planning, in order to get a stabilized process with good results regarding the quality of the product. Finally, there was a verification and validation of the optimized process followed by a second measurement of the energetic consumption of the machine (in kWh/ part) in which it was verified an energetic gain of 12 Wh/part, equivalent to an annual gain of 3 MWh, according to the production previsions to 2022.

KEYWORDS

RESISTANCE WELDING; ENERGY OPTIMIZATION; WELDING QUALITY; WELDING PARAMETERS.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Projeto.....	1
1.2. Apresentação da Empresa: Gestamp Cerveira, LDA.....	1
1.3. Metodologia.....	4
2. Introdução Teórica.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Soldadura por Resistência.....	5
2.3. Tipos de Instalações.....	7
2.4. Geometria dos Componentes a Soldar.....	9
2.5. Materiais.....	10
2.6. Ensaio para Averiguação da Qualidade das Juntas.....	13
2.7. Influência dos Diferentes Parâmetros do Processo.....	14
3. Caracterização do Processo Original.....	16
3.1. Variáveis com influência no processo.....	17
3.2. Peça Estampada e Componente.....	18
3.3. Ferramenta de Soldadura.....	21
3.4. Condições do Ensaio de Tração.....	22

3.5.	Parâmetros de soldadura.....	24
3.6.	Condições de refrigeração	25
3.7.	Medição do Consumo Energético Inicial.....	25
4.	Estudo experimental.....	29
4.1.	Condições do Ensaio de Tração	30
4.2.	Condições de Refrigeração	31
4.3.	Material dos Elérodos	32
4.4.	Otimização dos Parâmetros Operatórios do Processo.....	33
4.5.	Medição do Consumo Energético Final	36
4.6.	Validação de resultados.....	38
5.	Considerações finais	41
5.1.	Conclusões	41
5.2.	Perspetivas e Trabalhos Futuros	42
	Bibliografia	43
	Anexos	44
	Anexo A: Monitorização dos ensaios de tração ao longo da primeira metade do ano de 2022	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Grupo Gestamp no mundo (fonte: memória de sustentabilidade Gestamp, 2021).....	2
Figura 2: Exemplos de componentes produzidos na Gestamp Cerveira (fonte: Apresentação Gestamp Cerveira, 2022).....	2
Figura 3: Disposição das unidades autónomas de produção nas três naves da Gestamp Cerveira.	3
Figura 4: Calendarização sucinta de atividades a realizar no âmbito do projeto.	4
Figura 5: Representação esquemática do processo de soldadura por resistência – por pontos. ..	6
Figura 6: Representação esquemática do processo de soldadura por resistência – por protuberâncias.	6
Figura 7: Exemplo de máquina de soldadura pedestal.	7
Figura 8: Exemplo de instalação transfer de soldadura por protuberâncias.....	8
Figura 9: Exemplo de robôs de soldadura para soldadura por pontos.....	8
Figura 10: Peça com pontos de soldadura efetuados no robô de soldadura representado na figura 5.....	9
Figura 11: Componentes para soldadura por resistência com diferentes geometrias de protuberâncias.	9
Figura 12: Exemplo de modificação efetuada a um componente sujeito a soldadura por protuberâncias de modo a otimizar a superfície de contacto entre a chapa e o componente.	10
Figura 13: Alongamento e tensão de cedência de algumas famílias de aços (fonte: WorlAutoSteel).	11
Figura 14: Exemplo de cordão de soldadura deslocado devido a materiais diferentes.....	11
Figura 15: Diagrama da dureza dos revestimentos galvanizados (fonte: soldadura de aços galvanizados, José Ángel Ravelo).	12
Figura 16: Referências produzidas na máquina pedestal em estudo.	16
Figura 17: Resultados obtidos nos ensaios de tração da referência 1, em kN, num período de 6 meses.....	16
Figura 18: Resultados obtidos nos ensaios de tração da referência 2, em kN, num período de 6 meses.....	17
Figura 19: Sequência de estampagem do componente em estudo.....	20

Figura 20: Parafuso soldado por resistência no processo em estudo.....	20
Figura 21: Base da ferramenta de soldadura.....	21
Figura 22: Lança da ferramenta de soldadura.....	21
Figura 23: "Cap" de soldadura.....	22
Figura 24: Máquina na qual se realizam os ensaios destrutivos da referência em estudo.	23
Figura 25: Tubo (à esquerda) e punção (à direita) utilizados no ensaio de tração da referência em estudo.....	23
Figura 26: Alteração das fotos da base de dados dos ensaios de tração.....	30
Figura 27: Tubo e punção do ensaio de tração antes (à esquerda)e depois (à direita) de se retificar.	31
Figura 28: Monitorização dos resultados obtidos no mês de julho nos ensaios de tração da referência 1, em kN.....	38
Figura 29: Monitorização dos resultados obtidos no mês de julho nos ensaios de tração na referência 2, em kN.....	39
Figura 30: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em janeiro de 2022.	45
Figura 31: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em fevereiro de 2022...	45
Figura 32: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em março de 2022.	46
Figura 33: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em abril de 2022.	46
Figura 34:Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em maio de 2022.	46
Figura 35:Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em janeiro de 2022.	47
Figura 36: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em fevereiro de 2022...	47
Figura 37: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em março de 2022.....	47
Figura 38: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em abril de 2022.	48
Figura 39: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em maio de 2022.	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Comparação do ponto de fusão do zinco e do aço (fonte: Soldadura de Aceros Galvanizados, Gestamp 2022).	12
<i>Tabela 2: Lista de variáveis com influência no processo em estudo.</i>	18
Tabela 3: Características da bobina (Ficha técnica da referência - Gestamp Cerveira).	19
Tabela 4: Composição química da matéria prima da chapa (Gonvauto Galicia S.A.).	19
Tabela 5: Características do componente a soldar (Pecol Automotive, S.A.).....	19
Tabela 6: Composição química do parafuso soldado no processo em estudo (Pecol Automotive, S.A.).....	20
Tabela 7: Propriedades dos materiais aplicados no porta elétrodos (1) e nos elétrodos (2) (fonte: AMPCOLOY).	22
Tabela 8: Parâmetros de soldadura estabelecidos originalmente para cada referência.	24
<i>Tabela 9: Valores lidos no caudalímetro do posto de soldadura em estudo, num período de 15 dias</i>	25
Tabela 10: Resultados obtidos na medição do consumo energético inicial.....	26
Tabela 11: Custos fixos de eletricidade nas diferentes zonas horárias em 2021 e em 2022.	27
Tabela 12: Resultados obtidos no cálculo do custo energético para as referências 1 e 2 no ano de 2021.....	27
Tabela 13: Previsões do custo energético das referências 1 e 2 para o ano de 2022.	27
Tabela 14: Monitorização dos valores do caudalímetro após instalação do bloqueio mecânico.	32
Tabela 15: Resumo das propriedades relevantes dos materiais aplicados nos elétrodos (fonte: catálogo AMPCOLOY).	33
Tabela 16: Resultados obtidos no design of experiments.	35
Tabela 17: Parâmetros atualizados após modificações aplicadas.	35
Tabela 18: Comparação dos parâmetros iniciais e modificados. após as intervenções realizadas.	36
Tabela 19: Resultados da medição do consumo energético após atualização de parâmetros operatórios.	36
Tabela 20: Resultados dos ensaios de tração realizados durante o ensaio do consumo energético.	37

Tabela 21: Comparação do consumo energético antes e depois da otimização os parâmetros de soldadura.....	37
Tabela 22: Resultados dos custos energéticos associados ao processo de soldadura da referência 2 antes e depois da intervenção, segundo os custo fixo médio de eletricidade da fatura de maio de 2022.	37
Tabela 23: Resumo das informações mais relevantes retiradas do gráfico da figura 26.	38
Tabela 24: Resumo das informações mais relevantes retiradas do gráfico da figura 27.	39
Tabela 25: Calendarização ajustada perante os atrasos imprevistos.....	41
Tabela 26: Valores mínimos, máximos e médios obtidos nos ensaios de tração da referência 1 no primeiro semestre de 2022.	49
Tabela 27: Valores mínimos, máximos e médios obtidos nos ensaios de tração da referência 2 no primeiro semestre de 2022.	49

LISTA DE ABREVIATURAS

BIW	Body in White;
DOE	Design of Experiments;
MIG	Metal Inert Gas;
MAG	Metal Active Gas;
TIG	Tungsten Inert Gas;
UAP	Unidade Autónoma de Produção.
CMT	Cold Metal Transfer
LSC	Low-Spatter Control

1. INTRODUÇÃO

Nos capítulos 1.1 a 1.3 apresenta-se, respetivamente, o enquadramento do projeto desenvolvido nesta dissertação, a empresa na qual este projeto se levou a cabo, *Gestamp Cerveira* e, ainda, a metodologia adotada para a sua concretização.

1.1. ENQUADRAMENTO DO PROJETO

O projeto desta dissertação, desenvolvido na empresa *Gestamp Cerveira, LDA*, teve como objetivo a redução do consumo energético de um processo de soldadura por resistência, através da realização de estudos experimentais. No caso de estudo, a média dos resultados obtidos nos ensaios de tração (cerca de 22 kN) era, originalmente, significativamente superior ao mínimo exigido pelo cliente (15 kN). No entanto, os referidos resultados apresentavam uma grande variabilidade, pelo que exigiam um sobredimensionamento de parâmetros de modo a garantir a qualidade do produto. Desta forma, o objetivo deste trabalho passou por, inicialmente, minimizar a variação de resultados através de um estudo aprofundado seguido de uma estabilização do processo para, posteriormente, reduzir o sobredimensionamento de parâmetros e otimizar a eficiência energética do processo, ou seja, reduzir o input energético do processo assegurando a qualidade do produto.

Apesar do projeto ser aplicado a um caso de estudo particular, a empresa apresenta outras referências e instalações de soldadura igualmente passíveis de serem otimizadas. Deste modo, pretende-se ainda, com este projeto, definir uma abordagem metódica para, posteriormente, aplicar a todos os casos aos quais se apliquem.

1.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA: GESTAMP CERVEIRA, LDA.

A *Gestamp Cerveira, LDA*, empresa localizada em Vila Nova de Cerveira, pertence à multinacional espanhola *Corporación Gestamp*, líder nos setores do aço, componentes de automóvel, armazenamento e logística. Esta corporativa encontra-se dividida em três distintas linhas de negócio: componentes automóveis (*Gestamp Automoción*), serviços de aço (*Gonvarri*) e energias renováveis (*Gestamp Solar e Gestamp Eólica*). O *Grupo Gestamp* tem uma forte presença mundial, apresentando mais de 100 fábricas.



Figura 1: Grupo Gestamp no mundo (fonte: memória de sustentabilidade Gestamp, 2021).

Inserida na *Gestamp Automoción*, surge a *Gestamp Cerveira*, cuja origem partiu da necessidade de expansão da *Gestamp Vigo* que, assente na proximidade geográfica e nas boas relações transfronteiriças, escolheu Vila Nova de Cerveira para fundar a então denominada *Gestamp Portugal*.

A *Gestamp Cerveira* dedica-se ao desenho, desenvolvimento e manufatura de componentes e conjuntos metálicos para o setor automóvel, nomeadamente chassis, pedaleiras e, sobretudo, peças da carroceria do automóvel (em inglês, body in white – BIW). Na figura 2, apresentam-se alguns exemplos de peças produzidas na empresa.



Figura 2: Exemplos de componentes produzidos na Gestamp Cerveira (fonte: Apresentação Gestamp Cerveira, 2022).

No que diz respeito a processos produtivos, a *Gestamp Cerveira* contempla processos de:

- Estampagem (progressiva e transfer);

- Soldadura (por arco, por resistência, híbrida);
- Montagem.

A empresa, focada na sua visão de “ser o fornecedor automóvel mais reconhecido pela sua capacidade para adaptar os negócios até à criação de valor para o cliente, mantendo um desenvolvimento económico e sustentável” (Relatório de sustentabilidade Gestamp, 2021) apresenta continuidade nos seus objetivos de investir na melhoria dos seus equipamentos, tanto a nível tecnológico como no que diz respeito à sua eficiência. Neste âmbito, surge o propósito desta dissertação com o intuito de maximizar os recursos energéticos através da otimização dos processos.

A *Gestamp Cerveira* encontra-se dividida em 3 naves sendo que entre elas, no total, se distinguem oito unidades autónomas de produção (UAP), segundo a disposição que se apresenta na Figura 3.

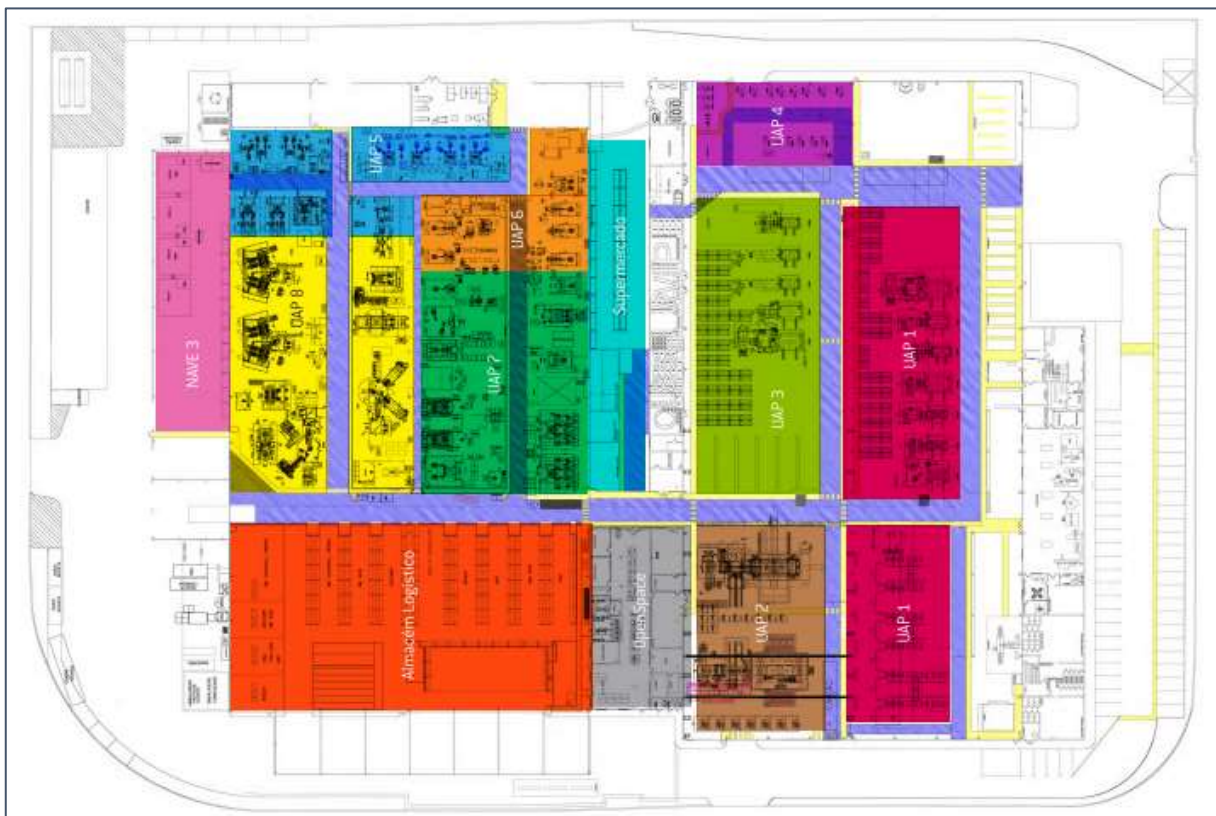


Figura 3: Disposição das unidades autónomas de produção nas três naves da Gestamp Cerveira.

A primeira nave contempla as unidades de produção 1,2, 3 e 4. As três primeiras consistem em unidades de estampagem, nas quais se distinguem onze prensas progressivas (de 630, 400 e 25 toneladas), uma prensa transfer (de 630 toneladas), duas prensas manuais (de 300 toneladas) e três prensas com possibilidade de trabalhar em progressivo e em transfer (uma de 1250 toneladas e duas de 1500 toneladas). A quarta unidade autónoma de produção (UAP4) consiste numa linha com 19

máquinas de soldadura por resistência manuais. Na nave 2, encontram-se as UAPs 5, 6, 7 e 8, sendo que a 5 é também ela dedicada à soldadura pedestal, a UAP6, consiste nas células de montagem das pedaleiras e as UAPs 7 e 8, são constituídas por células de soldadura. Na nave 3, encontra-se a zona de triagem e a jaula dos produtos não conformes.

1.3. METODOLOGIA

O presente documento visa detalhar o desenvolvimento do projeto supramencionado e, como tal, segue a estrutura adotada na realização do mesmo: primeiramente, apresenta-se o caso de estudo; seguidamente, faz-se um levantamento das variáveis que influenciam o processo de soldadura em estudo e, dessas, as que são passíveis de ser manipuladas; finalmente, efetua-se uma primeira medição do consumo energético, antes da intervenção nos parâmetros, com vista a caracterizar o estado inicial da máquina.

Numa segunda fase, dá-se início a uma manipulação iterativa dos parâmetros do processo com vista a reduzir a energia aplicada, sem comprometer os objetivos estipulados pelo cliente para a qualidade do produto. Nesta fase, como anteriormente referido, visou-se inicialmente estabilizar o processo, minimizando as variações de resultados obtidos nos ensaios destrutivos e, seguidamente, reduzir o input energético, de modo a utilizar somente a energia necessária obter a qualidade desejada para o produto (definiu-se inicialmente uma média objetivo de 18 kN para os ensaios de tração).

Por fim, uma vez obtido um processo estável e satisfatório, realiza-se uma análise e validação de resultados, efetuando uma segunda medição energética de modo a avaliar o ganho energético.

Na tabela 1, apresenta-se o *diagrama de Gantt* com a calendarização simplificada inicialmente definida para a realização do projeto.

Tabela 1: Calendarização sucinta de atividades a realizar no âmbito do projeto.

	Calendarização de Trabalhos a Realizar no Âmbito da Dissertação					
	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho
Caraterização do problema						
Recolha de dados						
Planeamento de experiências						
Execução de experiências						
Validação e conclusões						
Redação da dissertação						

2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Nos capítulos que se seguem são desenvolvidos alguns conceitos teóricos que ajudaram a melhor entender o processo em estudo bem como os seus inputs e outputs. Nomeadamente, aborda-se o processo de soldadura por resistência, os tipos de instalações, a geometria e os materiais dos componentes a soldar, os ensaios para averiguar a qualidade das juntas soldadas e, finalmente, os parâmetros operatórios do processo.

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e desenvolvidos alguns conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento do projeto. Inicialmente, faz-se uma introdução teórica ao processo em estudo e, em seguida, estudam-se as diferentes variáveis que influem no processo, sejam elas as variáveis físicas e químicas (como por exemplo a geometria e os materiais dos eletrodos, bem como dos componentes) ou os parâmetros do processo (como são exemplo a corrente e o tempo da soldadura).

2.2. SOLDADURA POR RESISTÊNCIA

Os processos de soldadura podem dividir-se em soldadura por fusão de material ou soldadura em estado sólido. Dentro dos processos de soldadura por fusão de material, destacam-se a soldadura por arco elétrico, a soldadura laser e a soldadura por resistência, sendo que o primeiro se procede mediante adição de material e os restantes não contemplam adição de material. A soldadura por resistência é um processo amplamente utilizado na indústria automóvel para a união de chapas e componentes, pela sua facilidade de adaptação a diferentes materiais e conjugações de junta, baixo tempo de ciclo, baixo custo e pela possibilidade de ser automatizado (Shafee et al., 2015). Por automóvel, existem cerca de 5000 juntas soldadas, sendo que grande parte destas surgem na estrutura e, como tal, estão fortemente relacionadas com a integridade e a segurança do carro e, conseqüentemente, do utilizador (Summerville et al., 2019), pelo que importa assegurar a qualidade deste processo de união.

No processo de soldadura por resistência, caracterizado por não utilizar material de adição, eletrodos de cobre pressionam os componentes a soldar, fazendo passar através destes uma corrente elétrica que, devido à sua resistência interfacial, gera uma concentração de calor nesse local, fundindo o material (Summerville et al., 2019). Na figura 4 apresenta-se uma representação esquemática do processo de soldadura por resistência bem como das resistências que este apresenta.

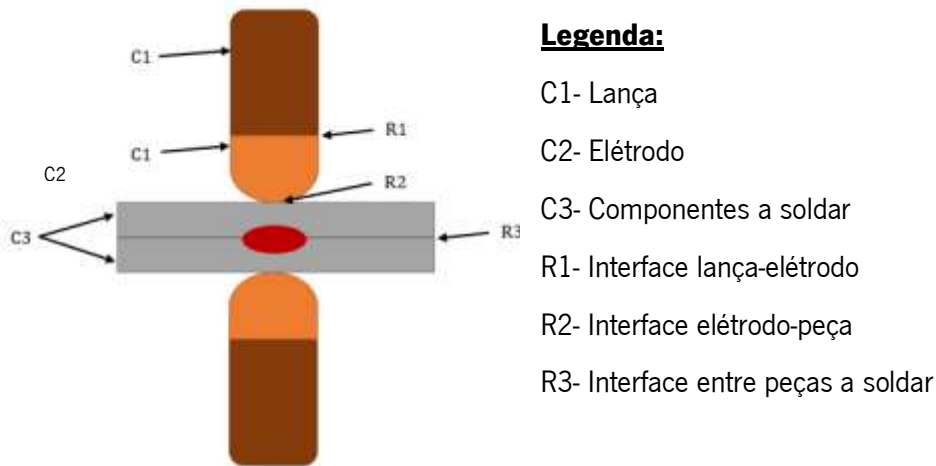


Figura 4: Representação esquemática do processo de soldadura por resistência – por pontos.

Dentro dos processos de soldadura por resistência contemplados na empresa, distinguem-se dois: soldadura por pontos (representado na figura 4) e soldadura por protuberâncias (representado na figura 5). O primeiro tipo é predominantemente utilizado para unir dois componentes de chapa. O nome deve-se à forma circular que toma a zona soldada. O segundo tipo, processo segundo o qual se fabrica a referência em estudo é soldadura por protuberâncias. Neste tipo de processo, efetua-se a soldadura entre dois componentes sendo que um deles (chapa, porca ou parafuso), apresenta umas saliências (ou protuberâncias) que, uma vez exercida a pressão dos eléctrodos, vão penetrar na chapa, concentrando, nessa zona, o calor e fundindo, resultando na união dos componentes a soldar.

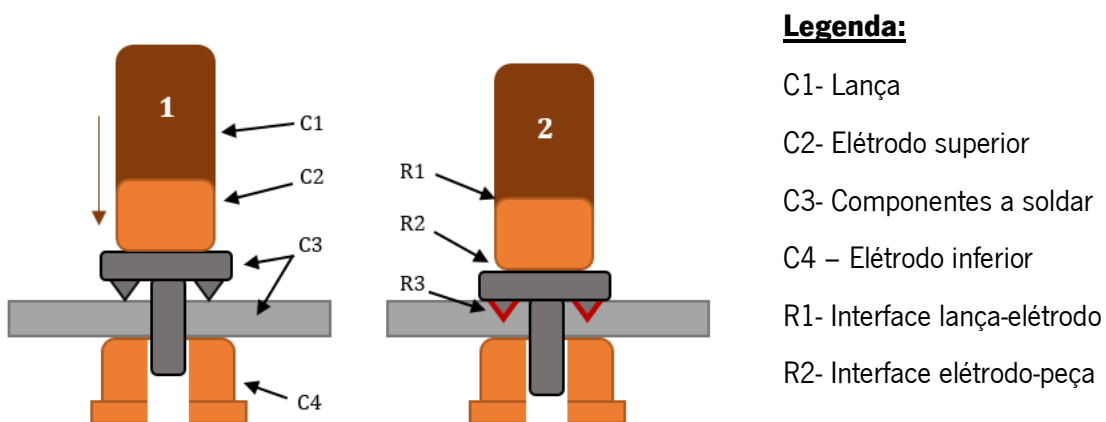


Figura 5: Representação esquemática do processo de soldadura por resistência – por protuberâncias.

Os principais parâmetros de soldadura são a corrente e o tempo de soldadura, a pressão dos elétrodos e a temperatura e caudal de refrigeração. Adicionalmente, existem muitos outros fatores que têm influência no processo de soldadura, são eles: a geometria, material e revestimento dos componentes a soldar, a geometria e material dos elétrodos, as condições ambientais envolventes, as condições de arrefecimento, entre outros.

Finalmente, para avaliar a qualidade das juntas soldadas por resistência, são utilizados diferentes ensaios sendo que estes se podem dividir pela sua natureza em destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios destrutivos mais recorrentes são: os ensaios de tração e torsão (para soldadura por protuberâncias) e os ensaios de cinzel (para soldadura por pontos). Por sua vez, a análise mediante ultrassons representa o método de avaliação não destrutivo mais utilizado na soldadura por pontos.

2.3. TIPOS DE INSTALAÇÕES

Nos processos de soldadura por resistência da Gestamp Cerveira são utilizadas duas tecnologias distintas: máquinas pedestais (manuais ou automáticas) e robôs de soldadura. As máquinas pedestais manuais (figura 6) apresentam uma maior versatilidade no sentido em que uma mesma máquina pode dedicar-se à soldadura de referências muito diferentes mediante a troca da ferramenta de soldadura (sendo o processo de troca relativamente fácil e célere).

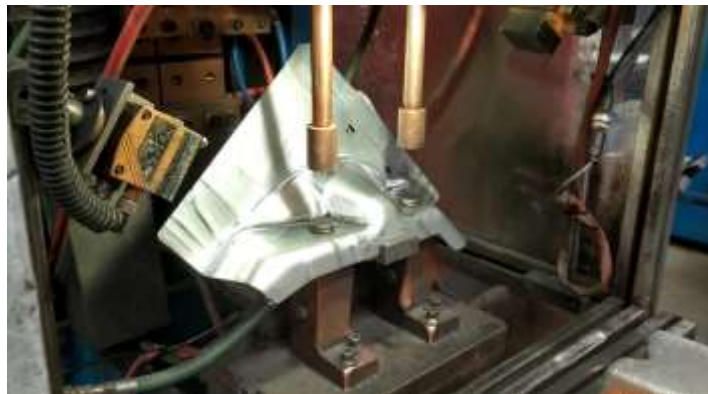


Figura 6: Exemplo de máquina de soldadura pedestal.

Por outro lado, as máquinas automáticas (figura 7) apresentam a vantagem de ter tempos de ciclo mais rápidos e menor probabilidade de erros (como por exemplo, uma errada colocação de componentes), uma vez que a alimentação dos componentes é automática. O funcionamento desta máquina é análogo ao funcionamento de uma prensa “transfer”, sendo que o operário coloca as peças no tapete de alimentação e, mediante um sistema de guias, são transferidas de posto em posto, sendo que em cada

posto sofrem uma operação distinta. No caso da figura 7, a instalação contempla cinco postos: um posto de alimentação da peça, três postos consecutivos onde são soldadas três porcas e, finalmente, um posto de inspeção onde é verificada a presença e correta orientação das porcas antes da sua ejeção, através da rampa final, para o contentor (caso se verifique a conformidade da soldadura) ou para o contentor de rejeição (caso não se verifique a conformidade da soldadura).



Figura 7: Exemplo de instalação transfer de soldadura por protuberâncias.

O último tipo de instalação mencionado (robôs de soldadura) trata-se da tecnologia mais avançada (figura 8). Nesta, o operário coloca as duas peças (simétricas) no tapete de alimentação, enquanto um robô pega na peça e a posiciona convenientemente, e um outro munido de pinças com eléctrodo nos cabeçais, faz os pontos de soldadura.



Figura 8: Exemplo de robôs de soldadura para soldadura por pontos.

Esta tecnologia é particularmente vantajosa em peças que apresentam um elevado número de pontos de soldadura. A peça apresentada na figura 9, leva um total de trinta e dois pontos de soldadura e tem

um tempo de ciclo de 72 segundos (sendo que a cada ciclo são produzidas duas referências). Em contrapartida, se este componente fosse produzido numa máquina manual, este tempo de ciclo seria significativamente superior devido à complexa disposição dos pontos de soldadura na geometria da peça.



Figura 9: Peça com pontos de soldadura efetuados no robô de soldadura representado na figura 5.

2.4. GEOMETRIA DOS COMPONENTES A SOLDAR

Como foi referido anteriormente, um dos fatores que influi na qualidade da soldadura por resistência é a geometria dos componentes a soldar. Neste aspeto, é particularmente relevante a planicidade das superfícies a soldar de modo a promover uma maior superfície de contacto e uma soldadura mais eficiente. Por outro lado, na soldadura por protuberâncias, para além da planicidade, importa atender à geometria das protuberâncias. Existem diferentes geometrias de protuberâncias: semicirculares, anelares, oblongas, entre outras (figura 10).



Figura 10: Componentes para soldadura por resistência com diferentes geometrias de protuberâncias (da esquerda para a direita: peça com protuberâncias oblongas, peça com protuberâncias semicirculares e peça com protuberância anelar).

Inicialmente, os eléctrodos exercem uma pressão sobre os componentes a soldar, forçando a penetração das protuberâncias na chapa. As protuberâncias nos componentes são, então, a zona onde se concentrará o calor aquando da passagem da corrente de soldadura e, conseqüentemente, são a zona

responsável pela fusão do componente com a chapa. Deste modo, quanto maior a superfície destas protuberâncias, maior a continuidade da soldadura.

Nalgumas referências com componentes mais críticos, isto é, em referências com maior recorrência de casos em que o componente soldado não cumpre os requisitos de qualidade estipulados, foram implementados na peça estampada, pequenos rebaixos (com a geometria negativa à geometria da protuberância). Nestes casos consegue-se, com uma menor pressão dos elétrodos, obter uma maior superfície de contacto e, assim, promover uma melhor soldadura. Na figura 11, apresenta-se um exemplo de um componente ao qual se aplicou uma mudança à geometria: neste caso, acrescentaram-se embutidos ao local de contacto entre a chapa e as protuberâncias do componente, de modo a aumentar a superfície de contacto entre ambos e, assim, promover uma melhor soldadura.

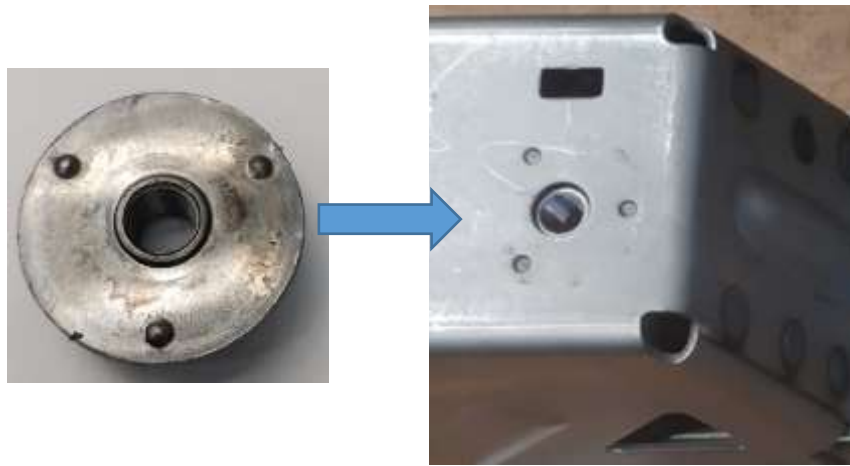


Figura 11: Exemplo de modificação efetuada a um componente sujeito a soldadura por protuberâncias de modo a otimizar a superfície de contacto entre a chapa e o componente.

2.5. MATERIAIS

Os materiais dos componentes a soldar são uma das variáveis de maior influência na qualidade da soldadura.

Os aços, material mais utilizado na indústria automóvel, são relativamente fáceis de soldar por resistência devido à sua condutividade térmica relativamente baixa e à sua elevada resistência elétrica. Dentro dos aços, aqueles que apresentam um conteúdo em carbono superior a 0,4% (aços de alto teor em carbono) são mais propícios a fissurar e, no limite, fraturar nas juntas soldadas devido à sua mais reduzida resistência à fratura dado que formam microestruturas de maior dureza.

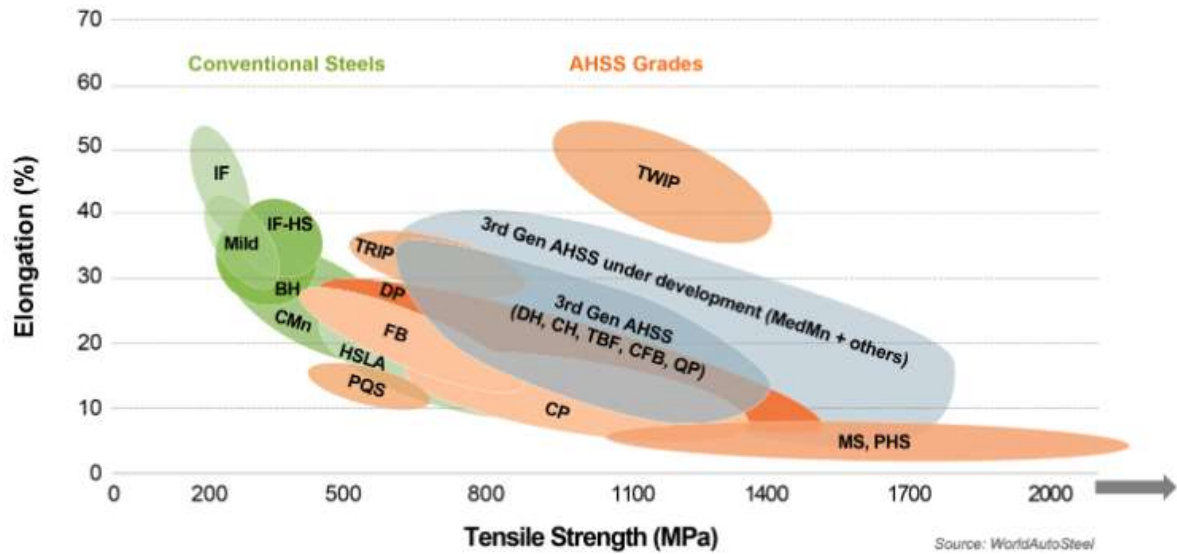


Figura 4: Alongamento e tensão de cedência de algumas famílias de aços (fonte: WorlAutoSteel).

Como se depreende da análise da figura 12, existem inúmeras famílias de aços com características muito distintas, no entanto, aqueles que são mais amplamente utilizados na indústria automóvel atualmente são os aços avançados de alta resistência (Advanced High Strength Steels ou AHSS), assinalados a laranja na figura 12.

Um problema que surge recorrentemente na soldadura por arco elétrico prende-se com o facto de muitos dos conjuntos soldados apresentarem materiais dissimilares, isto é, as peças a soldar apresentam materiais diferentes, sendo que, o material de adição pode apresentar maior compatibilidade metalúrgica com um dos materiais e, conseqüentemente, provocar uma tendência à deslocação do cordão de soldadura para um dos componentes. Um exemplo evidente deste fenómeno é o apresentado na figura 13. Neste caso, um dos materiais (material de maior afinidade metalúrgica, isto é, maior soldabilidade) é um aço DP1180, o outro (material de menor afinidade metalúrgica, ou seja, menor soldabilidade) é um aço DP780.



Figura 5: Exemplo de cordão de soldadura deslocado devido a materiais diferentes.

Outro problema que surge frequentemente na soldadura de aços na indústria automóvel prende-se com o revestimento. O galvanizado, revestimento típico das chapas de aço que tem como principal função proteger o material de fenómenos de corrosão e abrasão, consiste numa capa de zinco que envolve o material. O galvanizado, ao ser constituído por distintas camadas de ligas de zinco e ferro, sendo algumas mais duras que o ferro em si (consoante se depreende na análise à Figura 6), forma uma capa muito resistente à abrasão. Este revestimento é aplicado nas bobinas da chapa mantendo-se ao longo do processo de fabrico dos componentes e representa um problema para alguns destes processos.

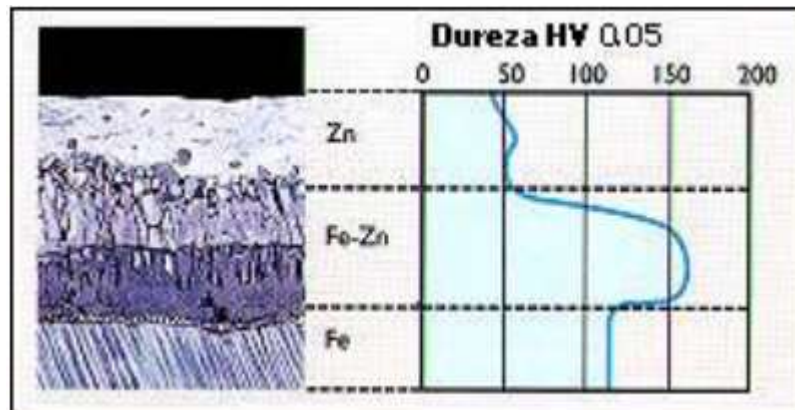


Figura 6: Diagrama da dureza dos revestimentos galvanizados (fonte: soldadura de aços galvanizados, José Ángel Ravelo).

No que diz respeito à soldadura, apesar de todas as técnicas de soldadura comumente aplicadas na indústria automóvel (soldadura por arco elétrico, soldadura por resistência, soldadura laser) poderem ser executadas em aços galvanizados, este revestimento acrescenta uma complexidade adicional ao processo. Tal acontece dado que o zinco tem uma temperatura de fusão e, inclusivamente, de ebulição, consideravelmente inferior à temperatura de fusão dos aços tipicamente utilizados nos componentes da indústria automóvel (aços de alta resistência), conforme se verifica na Tabela 1. Por este motivo, o zinco entra em ebulição antes de se dar início a fusão dos materiais base a soldar o que resulta em diversos defeitos de soldadura (como por exemplo projeções) e torna o processo de soldadura mais complexo.

Tabela 1: Comparação do ponto de fusão do zinco e do aço (fonte: Soldadura de Aceros Galvanizados, Gestamp 2022).

Material	Ponto de fusão	Ponto de ebulição
Zinco	~ 420 °C	~ 900 °C
Aço de alta resistência	~1500 °C	~2700°C

Dentro da soldadura por arco elétrico podem distinguir-se diferentes modos operatórios. Na Gestamp Cerveira, o mais utilizado trata-se do CMT (Cold Metal Transfer ou, em português, transferência fria de material). Este, consiste num modo com um input de temperatura reduzida e arco elétrico exceccionalmente estável, sendo interessante para a soldadura de metais dissimilares no geral e, em particular, nos aços galvanizados de modo a prevenir projeções devido às diferenças de temperaturas de fusão do aço e do zinco mencionadas anteriormente.

Além do CMT, destaca-se o modo LSC (Low-Spatter Control ou, em português, controlo de salpicos), que consiste num modo de curto circuito com baixa intensidade de corrente permitindo uma estabilidade do arco para velocidades mais elevadas.

2.6. ENSAIOS PARA AVERIGUAÇÃO DA QUALIDADE DAS JUNTAS

Uma vez definido o processo, deve comprovar-se a qualidade das juntas obtidas mediante testes que podem ser de dois tipos: destrutivos ou não destrutivos. Uma vez que os referidos testes são custosos quer a nível de tempo, quer a nível económico, de modo a averiguar a qualidade das juntas, estes testes são aplicados a peças seleccionadas de forma aleatória no local da produção, pelo que surge uma necessidade crescente de um método de avaliação efetivo, de baixo custo e alta fiabilidade para prever e assegurar a qualidade da junta durante a produção (Zhou et al., 2021). Dentro dos testes destrutivos aplicados nas juntas soldadas por resistência surgem, segundo apresentam Summerville e colaboradores (2019): o chisel-test (no qual se pressiona um cinzel entre as chapas junto ao local de soldadura, pressionando até à rotura); o peel-off test (no qual se recorre a um engenho de rolos para se fazer um peel e separar as duas chapas, sendo que este teste promove tipicamente a falha na zona termicamente afetada, uma vez que a carga se concentra fortemente num dos lados da soldadura); outros testes de resistência da soldadura como o tensile-shear ou U-tension (que usam máquinas para aplicar cargas quase estáticas e determinar a resistência das juntas medindo o diâmetro do botão após a falha). Dentro dos testes não destrutivos, surgem análises por ultrassons, termografias por infravermelhos e por correntes de Foucault e raios-x (onde se podem gerar imagens do cordão de soldadura sem a destruição da amostra), mas ainda análises por líquidos penetrantes.

Os ensaios por ultrassons são a tecnologia não destrutiva mais difundida para verificar a qualidade das juntas soldadas por resistência. Esta tecnologia envia pulsos de ondas sonoras de alta frequência e, uma vez que se conhece a velocidade do som e o modo segundo o qual se propaga nos materiais, quando reflete permite detetar a presença de fissuras, poros e outras discontinuidades metálicas. Dentro dos testes por ultrassons podem distinguir-se três tipos: A-Scan, B-Scan e C-Scan, sendo que o primeiro se

trata de um gráfico unidimensional (a amplitude do eco do som é dada em função do tempo); o segundo, é um gráfico bidimensional, medindo a espessura do material em diferentes posições ao longo do tempo; por sua vez, o C-Scan trata-se de um método mais sofisticado, tridimensional, representando a espessura do material em diferentes posições (quer vertical, quer horizontalmente), ao longo do tempo. Na *Gestamp Cerveira*, foi efetuado um estudo de modo a averiguar as vantagens adjacentes à implementação de ensaios não destrutivos C-Scan em prol de ensaios destrutivos às soldaduras por pontos. Para tal, durante um período de tempo inicial, mantiveram-se ambos ensaios em simultâneo com vista a validar os resultados obtidos mediante os ensaios não destrutivos. Uma vez validada a fiabilidade dos ensaios não destrutivos e a sua implementação, conseguiu-se uma poupança superior a 4000€ mensais em ensaios destrutivos.

Os ensaios por líquidos penetrantes são, também, implementados na *Gestamp Cerveira* com vista a averiguar a presença de fissuras nas ferramentas de estampagem. Funcionam segundo o seguinte princípio: aplica-se um líquido com uma densidade muito reduzida à superfície que se pretende analisar; em seguida, aplica-se um pó revelador à referida superfície que absorve o líquido das zonas de maior penetração e, uma vez que este pó muda de cor perante a presença do mesmo, revela a presença de fissuras com ligação à superfície. Este, trata-se de um método relativamente simples e económico, uma vez que dispensa grande investimento em equipamentos e se trata de uma metodologia relativamente simples, no entanto apresenta, em relação ao método anteriormente referido, a desvantagem de não detetar discontinuidades nem defeitos sem ligação à superfície.

Para a execução dos testes, surgem como guias orientadoras as normas dos clientes para os quais se exporta a peça sendo que, para os casos nas quais não se possa recorrer a estes, existem os standards da RWMA (Resistance Welding Manufacturers Association).

2.7. INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES PARÂMETROS DO PROCESSO

Os parâmetros principais, isto é, de maior influência no processo de soldadura por resistência, são a corrente de soldadura e o tempo de soldadura, sendo que estes se relacionam com o calor de acordo com a equação (1) (Sejč et al., 2020).

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

Onde:

Q – Calor gerado (em Joules);

R – Resistência elétrica (em ohms);

I – Corrente elétrica (em Amperes);

t – Tempo de aperto (em segundos).

Na equação (1), destaca-se que a intensidade da corrente surge associada a uma potência de dois pelo que, naturalmente, é o parâmetro que mais contribui para o calor gerado por resistência. Por sua vez a resistência (R) depende dos materiais a soldar pelo que, na maioria dos casos, não é um parâmetro possível de ser manipulado.

Na bibliografia, existem diversas experiências que recorrem ao *Método de Taguchi* com a finalidade de estabelecer a relação ótima entre os parâmetros principais do processo de soldadura por resistência: tempo de aperto, corrente de soldadura e tempo de soldadura para os diferentes pares de materiais (isto é, para diferentes resistências interfaciais).

Sejč e colaboradores (2020), distinguem dois modos de soldadura: soldadura dura, ou rápida (*hard welding mode*), que consiste em elevadas corrente e força de aperto durante um curto período de tempo de soldadura; e soldadura suave, ou lenta (*soft welding mode*), que consiste em aplicar baixas corrente e força de aperto durante um mais longo tempo de soldadura. Perante o teste de ambos modos de soldadura num par de um componente de aço e uma chapa de aço DP600, concluíram que o primeiro (modo de soldadura dura) dá origem a melhores características no que diz respeito à resistência da junta. Por outro lado, a soldadura suave apresenta faltas de fusão que prejudicam largamente a resistência da união soldada (Sejč et al., 2020).

3. CARATERIZAÇÃO DO PROCESSO ORIGINAL

O caso de estudo consiste numa máquina de soldadura pedestal, na qual se soldam duas referências simétricas (figura 15), cada uma delas constituída por uma chapa metálica de aço FB60, previamente estampadas (também na *Gestamp Cerveira*), à qual se soldam dois parafusos com protuberâncias (assinalados a azul na figura 16) recorrendo a soldadura por resistência.

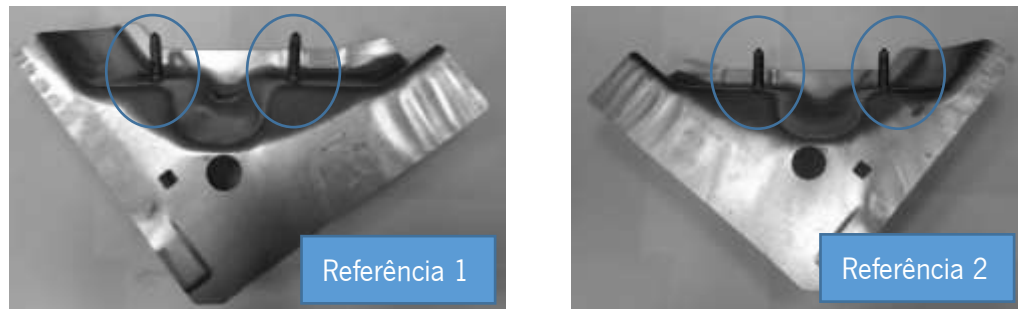


Figura 7: Referências produzidas na máquina pedestal em estudo.

Um estudo prévio realizado às duas referências produzidas (doravante referenciadas como peça 1 – referência do lado esquerdo - e peça 2 – referência do lado direito), revelou a variabilidade dos resultados de rotura obtidos nos ensaios de tração num período de seis meses (figuras 16 e 17), onde o valor 1 corresponde aos valores de rotura obtidos para o parafuso 1 (primeiro parafuso a ser soldado), o valor 2 corresponde aos valores de rotura obtidos para o parafuso 2 (segundo a ser soldado) e as linhas verde, amarela e vermelha representam, respetivamente, o valor mínimo de resistência à rotura exigido pelo cliente e os valores mínimos e máximos registados no ensaio de resistência à tração.

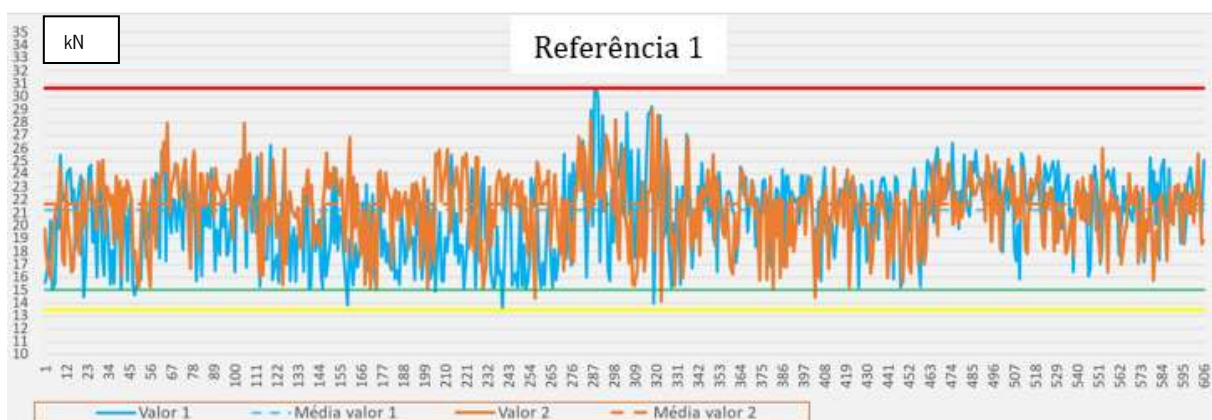


Figura 8: Resultados obtidos nos ensaios de tração da referência 1, em kN, num período de 6 meses.

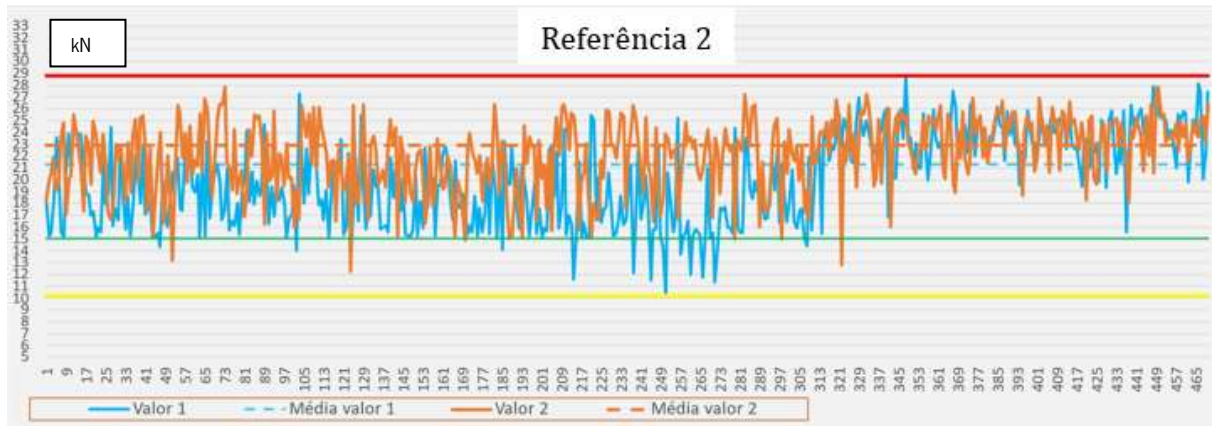


Figura 9: Resultados obtidos nos ensaios de tração da referência 2, em kN, num período de 6 meses.

O valor mínimo estipulado pelo cliente para os ensaios de tração é de 15 kN. Depreende-se da análise das figuras 17 e 18, que a média de valores obtidos nos ensaios de tração ao longo dos seis meses analisados (cerca de 22 kN) é significativamente superior ao valor a cumprir, no entanto, devido à grande variabilidade de resultados, este sobredimensionamento torna-se necessário de modo a reduzir o número de valores abaixo do valor alvo. Este sobredimensionamento deve-se, porém, a uma abordagem tipicamente reativa perante a falha, isto é, se aquando da monitorização da qualidade do componente não forem alcançados os objetivos, é frequente aumentar o input energético para compensar o desvio em prol de se fazer uma análise ao processo e à sua origem. Deste modo, reduzem-se as paragens e otimiza-se a produtividade.

Assim, com o projeto a desenvolver no âmbito da presente dissertação, pretendeu-se primeiramente estudar e estabilizar o processo, de modo a obter menor variabilidade de resultados e, seguidamente, efetuar uma manipulação de parâmetros de modo a reduzir o consumo energético sem comprometer a qualidade do produto.

3.1. VARIÁVEIS COM INFLUÊNCIA NO PROCESSO

De modo a caracterizar o processo original, começou por se fazer um levantamento das variáveis com influência no processo (*Tabela 2*), verificando adicionalmente quais das referidas variáveis seriam passíveis de ser alteradas de modo a atingir o objetivo.

Tabela 2: Lista de variáveis com influência no processo em estudo.

Variáveis	Alterável?	Variáveis	Alterável?
Material da chapa	Não	Tempo de aproximação	Sim
Espessura de Galvanizado	Não	Tempo de aperto	Sim
Material dos elétrodos	Sim	Tempo de soldadura	Sim
Geometria dos elétrodos	Sim	Tempo de arrefecimento	Sim
Caudal de refrigeração	Sim	Corrente de soldadura	Sim
Temperatura de refrigeração	Não	Força dos elétrodos	Sim
Planidade da peça estampada	Não	Máquina do ensaio de tração	Não
Material dos parafusos	Não	Punções do ensaio	Sim
Protuberâncias dos parafusos	Não	Sensibilização dos colaboradores	Sim

O material da chapa e a espessura do galvanizado da chapa do componente não são alteráveis uma vez que se trata do material homologado com o cliente. Por sua vez, o material e a geometria dos elétrodos são manipuláveis dado serem produzidos internamente. Relativamente ao caudal e à temperatura de refrigeração, o primeiro é alterável uma vez que a máquina possui uma válvula que permite a sua regulação. Por sua vez, o segundo não o é sendo que a água utilizada no circuito de refrigeração é abastecida diretamente da rede geral da fábrica. A planicidade da peça estampada não é também manipulável uma vez que o processo de estampagem do componente admite variações incontornáveis que afetam este parâmetro. Relativamente aos parafusos a soldar, são também componentes homologados com o cliente pelo que não podem ser manipulados. Os parâmetros de soldadura, por sua vez, podem todos ser manipulados, são eles: o tempo de aproximação, o tempo de aperto, o tempo de soldadura, o tempo de arrefecimento, a corrente de soldadura e a força dos elétrodos. Finalmente, no que diz respeito às condições do ensaio de tração, podem manipular-se os punções do ensaio bem como fomentar as boas práticas dos colaboradores relativamente ao referido ensaio, no entanto, não se pode alterar a máquina utilizada na sua realização.

Nos próximos capítulos faz-se a caracterização das variáveis supramencionadas.

3.2. PEÇA ESTAMPADA E COMPONENTE

Como referido anteriormente, o material dos componentes a soldar (chapa e parafusos) não é manipulável uma vez que estes foram homologados com o cliente aquando do início do projeto e, conseqüentemente, não podem ser modificados. Nas tabelas 3 e 4 apresentam-se, respetivamente, a caracterização da matéria-prima da chapa e a sua composição química.

Tabela 3: Características da bobina (Ficha técnica da referência - Gestamp Cerveira).

Caraterísticas da Bobina			
Espessura	Largura	Revestimento	Espessura do revestimento
2 mm	690 mm	Galvanizado	10 μm / 10 μm

A bobina da peça estampada apresenta uma espessura de 2 mm e uma largura de 690 mm, é constituída por um revestimento de galvanizado com uma espessura de 10 micrómetros em cada face (sendo que a tolerância para esta espessura é de 0 a + 0,3 μm).

Tabela 4: Composição química da matéria prima da chapa (Gonvauto Galicia S.A.).

Composição Química (% mássica)															
Ceq. máx	C máx	Mn máx	Si máx	P máx	S máx	Al mín	Nb máx	Ti máx	V máx	Cr máx	Mo máx	B máx	N máx	Ti+ Nb máx	Cr+Mo máx
0,440	0,180	1,600	0,450	0,025	0,010	0,015	0,030	0,030	0,060	0,100	0,040	0,005	0,008	0,050	0,100

A peça estampada é constituída por um aço FB60, trata-se de um aço com um teor de carbono máximo de 0,18%. Tratando-se de um material com um relativamente baixo teor de carbono, formam microestruturas de menor dureza e, como tal, uma maior resistência à fratura na zona afetada termicamente.

Tabela 5: Características do componente a soldar (Pecol Automotive, S.A.).

Caraterísticas do Parafuso			
Métrica	Diâmetro Protuberâncias	Dureza	Tensão de Cedência
M12	5,61 - 5,64 mm	37-38 HRC	1139 - 1232 MPa

No que diz respeito à geometria da peça estampada, apesar das referências serem divididas em duas (de acordo com o seu consumo em cliente) - referência do lado esquerdo e referência do lado direito, representadas na figura 18 -, o estudo aprofundado que se levou a cabo nas etapas iniciais do projeto revelou que, devido ao modo como são estampadas (Figura 10), tratam-se efetivamente de quatro peças com características de planeza e muito distintas entre si:

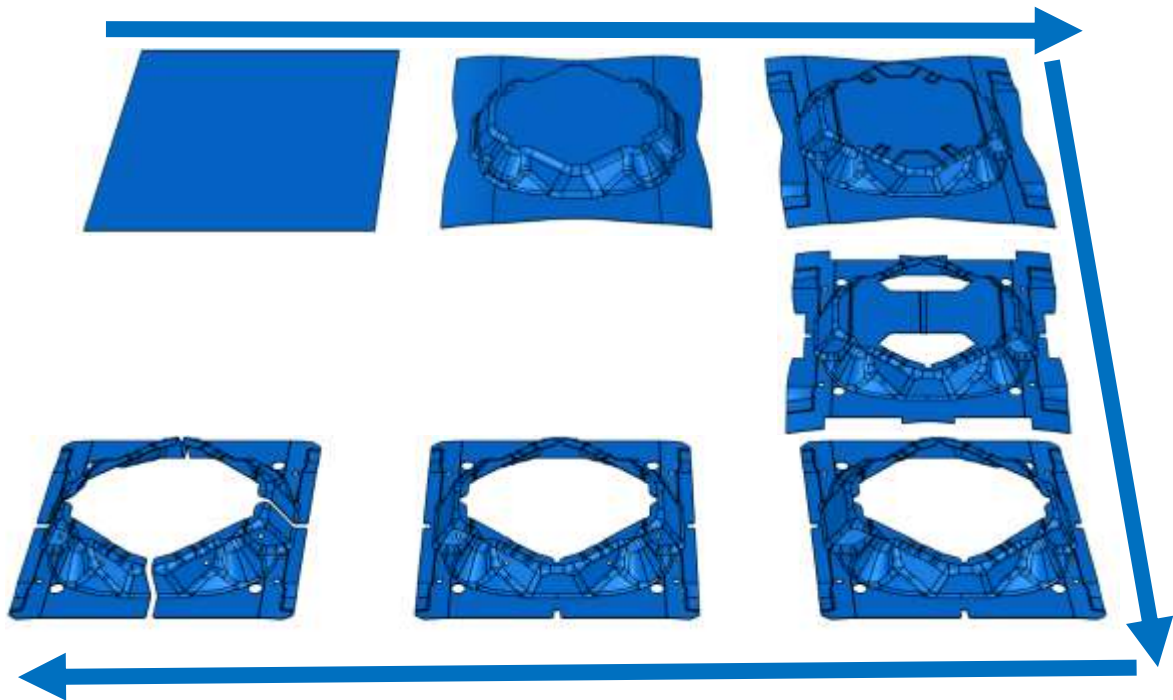


Figura 10: Sequência de estampagem do componente em estudo.

Como se verifica na figura 18, por cada golpe, saem do processo de estampagem quatro peças e, conseqüentemente, devido as variabilidades inerentes ao processo, as duas peças esquerdas são diferentes entre si e, do mesmo modo, as peças direitas são, também distintas.

O parafuso a soldar apresenta uma dureza e uma tensão de cedência elevadas (tabela 6).



Figura 11: Parafuso soldado por resistência no processo em estudo.

Como se verifica na Figura 11, as protuberâncias do parafuso a soldar apresentam uma forma semicircular e têm um diâmetro que pode variar entre 5,61 e 5,63 mm. Por sua vez, o diâmetro métrico é de 12 mm (ver características apresentadas na tabela 5).

Tabela 6: Composição química do parafuso soldado no processo em estudo (Pecol Automotive, S.A.).

Composição Química (% mássica)						
C	Si	Mn	P	S	Al	B
0,36	0,715	0,076	0,004	0,004	0,032	0,004

O parafuso consumido no processo de soldadura é constituído por aço e apresenta um teor de carbono significativamente superior ao teor do material da chapa dando, portanto, origem a uma microestrutura mais dura e com maior tendência à fratura.

3.3. FERRAMENTA DE SOLDADURA

A máquina de soldadura pedestal em estudo é constituída por uma base (figura 20) que assenta na estrutura da máquina e onde constam os porta-elérodos, os eléctrodos inferiores e os apoios das peças; pelos eléctrodos superiores, constituídos pelas lanças (figura 21) e pelos “caps” (figura 22); por dois circuitos: um de refrigeração e um pneumático e por uma câmara e sensores, que detetam a presença e conformidade dos componentes a soldar.

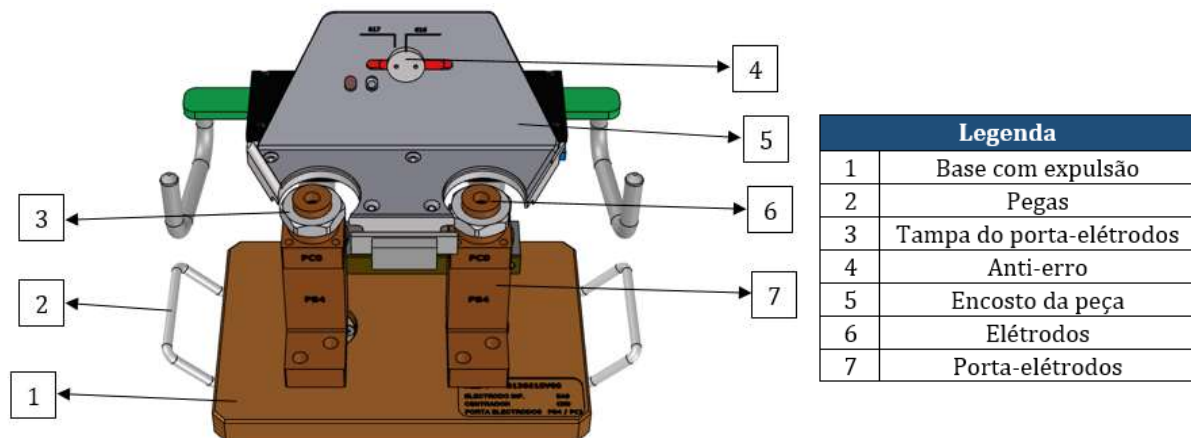


Figura 20: Base da ferramenta de soldadura.



Figura 21: Lança da ferramenta de soldadura.



Figura 22: "Cap" de soldadura.

Outro fator de elevada relevância no processo de soldadura em estudo é o material dos elétrodos. Originalmente, os elétrodos eram constituídos pelo material *AMPCO 95*, e os porta-elétrodos, por sua vez, constituídos pelo material *AMPCO 972*, cujas propriedades se encontram detalhadas na tabela 7.

Tabela 7: Propriedades dos materiais aplicados no porta elétrodos (1) e nos elétrodos (2) (fonte: AMPCOLOY).

	AMPCO 972 (1)	AMPCO 95 (2)
Composição química	98,8Cu 1Cr 0,1Zr	97,2Cu 0,5Be 2Co+Ni
Dureza Rockwell/ Brinell	78B/ 140	95B/ 240
Tensão de cedência (Mpa)	370	537
Alongamento (%)	13	17
Condutividade elétrica (%IACS)	78	45
Condutividade térmica (W/mK)	310	218
Módulo de Young (Gpa)	112	117
Temperatura máx. de funcionamento (°C)	500	450

Depreende-se, da análise da tabela 7, que o material aplicado no porta-elétrodos apresenta uma condutividade elétrica (78% da condutividade elétrica do cobre puro) significativamente superior à condutividade elétrica do material dos elétrodos (45 %), sendo que esta diferença representa um “obstáculo” à passagem da corrente elétrica e, como tal, está associada a uma perda de energia. Idealmente, deveria aplicar-se o mesmo material ao eletrodo e ao porta-elétrodos, de modo a que exista continuidade de material e, assim, a resistência máxima corresponda à interface entre os componentes a soldar, ou seja, de modo a prevenir dissipação energética e a concentrar a energia sob a forma de calor na zona a soldar.

3.4. CONDIÇÕES DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a monitorização da qualidade da junta soldada e prevenção de defeitos, o cliente exige ensaios de tração com um valor de rotura mínimo de 15 kN. Estes ensaios são realizados ao longo da produção de cada referência, de acordo com a seguinte frequência:

- 2 peças no controlo de arranque de produção, pelo chefe de linha;

- 1 peça por cada 450 produzidas, pelo operador;
- 2 peças por turno pelos controladores da qualidade.

Os ensaios são realizados numa máquina *Hoytom* (figura 23) recorrendo a um tubo e a um punção com as características especificadas na norma do cliente, sendo que o primeiro parafuso a ser destruído corresponde ao primeiro parafuso a ser soldado.



Figura 23: Máquina na qual se realizam os ensaios destrutivos da referência em estudo.

Por sua vez, o tubo e o punção utilizados para o ensaio são os que se apresentam na Figura 12.



Figura 12: Tubo (à esquerda) e punção (à direita) utilizados no ensaio de tração da referência em estudo.

Como se verifica na Figura 12, os elementos utilizados no ensaio de tração não se apresentavam nas melhores condições. O mau estado do tubo, em particular, influi na fiabilidade dos resultados do ensaio uma vez que é neste que se dá o assentamento da peça e um assentamento inconstante tem como consequência resultados inconstantes nos ensaios.

Outra constatação que se retirou da análise efetuada às condições dos resultados dos ensaios de tração foi que, muitas vezes, os colaboradores responsáveis pelo ensaio não respeitavam a metodologia estabelecida, isto é, em vez de efetuar o ensaio ao parafuso soldado em primeiro lugar e, em seguida, ao segundo parafuso a ser soldado, invertiam a ordem de realização, contribuindo também para uma menor fiabilidade de resultados.

3.5. PARÂMETROS DE SOLDADURA

No que diz respeito aos parâmetros de soldadura, os parâmetros que estavam originalmente definidos eram os que se apresentam na tabela 8. Importa ressaltar que, apesar de as duas referências serem idênticas, serem produzidas na mesma máquina e utilizarem a mesma ferramenta de soldadura bem como os mesmos consumíveis (elétrodos), a referência 2 apresenta valores superiores para a força do eletrodo e para o tempo e a corrente de soldadura, o que demonstra a viabilidade da manipulação destes parâmetros de modo a alcançar o objetivo e reduzir o consumo energético do processo.

O aumento de parâmetros da referência 2 foi uma medida reativa na qual, perante um decréscimo na qualidade da peça, se subiram os parâmetros da soldadura de modo a assegurar o valor mínimo exigido pelo cliente. Este procedimento, no entanto, não é sustentável dado que, de modo a garantir produção, não se analisa a origem do problema podendo estar a incorrer num aumento de parâmetros injustificado e desnecessário.

Tabela 8: Parâmetros de soldadura estabelecidos originalmente para cada referência.

	Referência 1		Referência 2	
	Parafuso 1	Parafuso 2	Parafuso 1	Parafuso 2
Tempo de aproximação (ms)	10	10	10	10
Tempo de aperto (ms)	10	10	10	10
Tempo de soldadura (ms)	13	13	13	13
Corrente de soldadura (kA)	22	22	24	24
Tempo de arrefecimento (ms)	20	20	20	20
Número de impulsos	1	1	1	1
Força dos elétrodos (kN)	4,5	4,5	5,5	5,5

3.6. CONDIÇÕES DE REFRIGERAÇÃO

Na refrigeração dos eléctrodos, encontrou-se a maior variabilidade de condições. Na tabela 9, apresentam-se os resultados obtidos na monitorização dos valores lidos no caudalímetro num período de 15 dias.

Tabela 9: Valores lidos no caudalímetro do posto de soldadura em estudo, num período de 15 dias.

Data / Hora	Caudal (l/min)
01/02/2022 - 16h58	28,8
02/02/2022 - 08h17	29
07/02/2022 - 15h14	24,2
07/02/2022 - 15h59	24,8
10/02/2022 - 09h31	13,2
10/02/2022 - 14h40	14,5
11/02/2022 - 07h57	16,4
11/02/2022 - 14h21	13,9
14/02/2022 - 15h52	10,3

Da análise da tabela 9, verifica-se que os valores do caudalímetro apresentam uma variação anómala, tendo-se registado um mínimo de 10,3 l/min e um máximo de 29 l/min num período de duas semanas. Inicialmente, atribuiu-se esta variação ao número de máquinas em funcionamento, isto é, uma vez que todas as máquinas da unidade de produção 4 (UAP4) são alimentadas a partir de uma rede comum, existe uma variação no caudal de água de arrefecimento, dependendo do número de máquinas em funcionamento na referida linha.

No entanto, uma segunda monitorização revelou que não havia uma correlação suficientemente forte que explicasse a variação. Finalmente, concluiu-se que a válvula reguladora do caudal, apesar de se encontrar numa zona de difícil acesso, não contemplava nenhum bloqueio, pelo que qualquer pessoa poderia manuseá-lo. Numa monitorização mais restrita, adicionou-se um marcador de maneira a permitir perceber se a posição da válvula efetivamente estava a ser manipulada.

3.7. MEDIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO INICIAL

Para finalizar a caracterização do estado inicial do caso de estudo, efetuou-se uma medição do consumo energético, mediante um analisador de redes *Fluke 434*. Para tal, e uma vez que as duas referências produzidas no posto de soldadura em estudo apresentam diferentes parâmetros e, conseqüentemente, diferentes consumos, planearam-se quatro medições:

- 1h de medição durante a produção da primeira referência no turno da manhã;
- 1h de medição durante a produção da primeira referência no turno da tarde;
- 1h de medição durante a produção da segunda referência no turno da manhã;
- 1h de medição durante a produção da segunda referência no turno da tarde.

Para cada medição, registou-se ainda o número de peças produzidas de modo a calcular o consumo energético por peça fabricada (kWh/peça). Na tabela 10 apresentam-se os resultados obtidos nas medições. Importa salientar que, dado na primeira medição se ter averiguado que independentemente do número de peças produzidas o consumo energético se mantém constante, apenas se realizou a medição do consumo da outra referência num turno.

Tabela 10: Resultados obtidos na medição do consumo energético inicial.

Data	Ref.	Turno	Duração	Nº Peças Produzidas	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/peça)
11/02/2022	2	Manhã	1h	182	4,240	0,02330
11/02/2022	2	Tarde	1h	277	6,498	0,02346
22/02/2022	1	Tarde	1h	221	4,112	0,01861

Como seria expectável o consumo energético (kWh/peça) da referência 1 foi inferior ao consumo da referência 2, consequência da divergência de parâmetros de soldadura aplicados na máquina, designadamente a intensidade de corrente e a força dos elétrodos (Tabela 8). Uma vez obtidos os resultados do consumo energético por peça, fizeram-se dois estudos:

- O primeiro estudo consistiu na avaliação da perda económica obtida em 2021 devido ao sobredimensionamento nos parâmetros de soldadura da referência 2 (tabela 12);
- O segundo estudo consistiu numa estimativa (perante as previsões de consumo de ambas as referências) da perda económica para 2022 devido ao referido sobredimensionamento de parâmetros (tabela 13).

Para tal, recorreu-se aos custos fixos de eletricidade retirados das faturas de dezembro de 2021 e de janeiro de 2022, custos estes discriminados na tabela 11. Uma vez que a empresa trabalha 24h por dia, isto é, uma vez que trabalha sobre todas as zonas horárias, utilizou-se uma média destes valores de modo a estimar os custos médios pretendidos.

Tabela 11: Custos fixos de eletricidade nas diferentes zonas horárias em 2021 e em 2022.

Preços Fixos de Eletricidade (€/ kWh)		
	12/2021	01/2022
Ponta	0,05595	0,20231
Cheia	0,05291	0,19086
Vazio	0,04759	0,17290
Super vazio	0,04433	0,16037
Média	0,05020	0,18161

Tabela 12: Resultados obtidos no cálculo do custo energético para as referências 1 e 2 no ano de 2021.

Custo Médio (€/kWh)	Consumo energético (kWh/peça)	Custo/peça (€/peça)	Volume Produção	Custo energético 2021	Ref.
0,050195	0,0234	0,0011746	300000	352,38	2
0,050195	0,0186	0,0009336	300000	280,08	1

A perda económica média resultante no ano de 2021 devido ao aumento de parâmetros na referência 2 foi de 72,30 €. Este valor é aparentemente residual, no entanto, a unidade autónoma de produção 4 (UAP4) é constituída por 19 máquinas às quais, uma vez estandardizada a abordagem desenvolvida neste projeto, se pode aplicar uma redução similar. Adicionalmente, esta diferença provém unicamente de igualar os parâmetros das duas referências, sendo que a este valor se pode somar um possível ganho advindo da redução dos parâmetros da referência 1 que apresenta também uma média de valores dos ensaios destrutivos consideravelmente superior ao valor exigido pelo cliente.

Como anteriormente referido, uma vez obtida a perda económica e energética registadas em 2021 devido à diferença de parâmetros, partiu-se da previsão de produção das referências para 2022, bem como dos valores da fatura de janeiro do mesmo ano, para estimar o prejuízo económico estimado para o mesmo ano. Apresentando-se os resultados da referida previsão na tabela 13.

Tabela 13: Previsões do custo energético das referências 1 e 2 para o ano de 2022.

Custo Médio (€/kWh)	Consumo energético (kWh/peça)	Custo/peça (€/peça)	Volume Produção	Custo energético 2022	Ref.
0,18161	0,0234	0,0042497	250000	1062,43	2
0,18161	0,0186	0,0033775	250000	844,38	1

O prejuízo médio estimado para o ano de 2022 devido ao aumento de parâmetros na referência 2 é de 218,05 €.

Este último é, portanto, o valor mínimo que se espera ganhar com a manipulação dos parâmetros da máquina em estudo. No entanto, importa ressaltar que, mesmo a referência 1 cujo consumo é menor, se encontra consideravelmente acima dos objetivos estipulados uma vez que a média dos resultados obtidos nos ensaios de tração é, como referido anteriormente, de 22 kN (face ao valor exigido de 15 kN). Desta forma, ao ganho anual calculado, poderia ainda somar-se o ganho resultante de aproximar o valor médio ao valor exigido, no caso de obter, com este projeto, resultados satisfatórios.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

Uma vez realizado o levantamento de variáveis bem como a sua caracterização, averiguou-se as que seriam viáveis manipular de maneira a alcançar os objetivos propostos. Desta análise, concluiu-se que poderiam obter-se melhorias no processo e, desta forma, reduzir o seu input energético:

- Fazendo uma mudança na abordagem da peça estampada, isto é, em vez de trabalhar as peças estampadas como duas referências distintas (mão esquerda e mão direita), abordá-las como quatro referências distintas (duas esquerdas e duas direitas), uma vez que, efetivamente, resultam quatro peças com características distintas do processo de estampagem;

- Retificando os equipamentos bem como os procedimentos mediante os quais se realizam os ensaios de tração;

- Na regularização do caudal de refrigeração;

- Na alteração do material dos elétrodos.

Como se referiu no capítulo 4.1 do presente relatório, as peças estampadas são tratadas como duas referências distintas (referências 1 e 2). Como tal, os parâmetros de soldadura são atribuídos em dois programas distintos e a monitorização dos ensaios de tração segue, também, este princípio. No entanto, devido ao processo de estampagem, do qual saem quatro peças por golpe (e não duas), as duas peças da referência 1, do mesmo modo que as duas peças da referência 2, diferem entre si no que diz respeito a características de planicidade e, conseqüentemente, apresentam diferentes requisitos a nível de parâmetros de soldadura de modo a obter uma soldadura eficiente. Uma vez que tal não acontece e as referências são tomadas como uma só, os parâmetros são uniformes e dimensionados para a peça de maiores requisitos. Este dimensionamento é, em parte, responsável pela grande variação de resultados que surgem nos gráficos de monitorização dos ensaios de tração.

Perante isto, avaliou-se a possibilidade de tratar as referências como quatro referências distintas, isto é, em vez de abordar as quatro referências como duas referências 1 e duas referências 2, tratá-las como referências 1, 1', 2 e 2'.

Inicialmente foi alterada a marcação das peças estampadas de maneira a que se pudessem distinguir as referências entre si. No entanto, numa segunda fase, pretendia-se alterar a instrução de trabalho de modo a dividir as peças não em dois, mas em quatro contentores. Esta alternativa revelou-se inviável por dois motivos: em primeiro lugar, devido ao tempo de ciclo da máquina, que é de tal modo

elevado, que não permite ao colaborador acondicionar as referências em quatro contentores distintos e, para tal, teria que aumentar-se o número de pessoas na máquina; por outro lado, a inviabilidade desta medida prendeu-se também com o layout, uma vez que o espaço disponível em torno da prensa não permite alocar quatro contentores com as dimensões especificadas para a referência em estudo.

4.1. CONDIÇÕES DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Nas condições do ensaio de tração, o principal problema reportado encontrava-se relacionado com a mão de obra, isto é, prendiam-se com uma incorreta manipulação dos equipamentos e com uma certa negligência da sequência dos parafusos a destruir. Deste modo, começou por se alterar as fotos da base de dados dos ensaios que os colaboradores têm que consultar e na qual têm que registar os ensaios. Esta alteração apresenta-se ilustrada na Figura 13 sendo que à esquerda se encontra a imagem inicial e, à direita, a imagem alterada.



Figura 13: Alteração das fotos da base de dados dos ensaios de tração.

Esta alteração visou tornar mais intuitiva a interpretação da instrução de realização do ensaio, uma vez que se colocou a foto na posição de realização do mesmo. Adicionalmente, realizou-se uma reunião em cada turno de produção, para a qual se convocaram os encarregados da unidade autónoma de produção bem como os *team leaders*, com o intuito de sensibilizar os colaboradores para a correta realização dos ensaios, ressaltando a importância de cumprir a sequência de realização do ensaio.

Uma outra modificação que se aplicou, foi a retificação do tubo e do punção do ensaio de tração de modo a garantir um melhor assentamento da peça e a assegurar a fiabilidade dos resultados obtidos.

Na figura 26, apresenta-se o estado dos instrumentos mediante os quais se realizam os ensaios de tração antes e depois da sua retificação.

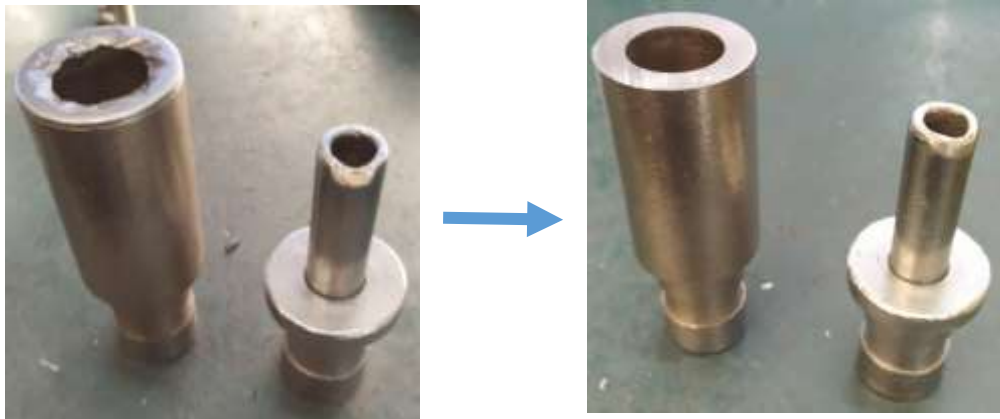


Figura 14: Tubo e punção do ensaio de tração antes (à esquerda) e depois (à direita) de se retificar.

4.2. CONDIÇÕES DE REFRIGERAÇÃO

Como se verificou no capítulo 3.6, uma das variáveis de maior variação no processo era o caudal de refrigeração e, sendo esta uma variável de elevada influência no processo, impera assegurar uma boa condição de refrigeração de modo a assegurar uma boa soldadura. Apesar de numa primeira análise se ter associado as variações do caudal de refrigeração ao número de máquinas em funcionamento na UAP 4, um estudo mais aprofundado devido à fraca correlação entre estas variáveis, permitiu concluir que a válvula de regulação do caudal da máquina não estava bloqueada o que permitia a sua manipulação por parte de qualquer utilizador.

De modo a minimizar as variações do caudal e ainda não permitir a sua regulação a pessoas não competentes para tal, optou-se por se instalar um bloqueio mecânico.

Uma vez implementado o referido bloqueio mecânico, efetuou-se uma segunda monitorização dos valores lidos no caudalímetro, sendo os resultados os que se apresentam na Tabela 14:

Tabela 14: Monitorização dos valores do caudalímetro após instalação do bloqueio mecânico.

Data / Hora	Caudal (l/min)
13/06/2022 - 13h15	18,1
14/06/2022 - 8h30	17,0
15/06/2022 - 8h20	17,8
17/06/2022 - 10h08	17,6
20/06/2022 - 16h30	18,2
21/06/2022 - 8h15	18,4
22/06/2022 - 8h15	17,9
23/06/2022 - 12h10	17,6
24/06/2022 - 14h00	18,2
27/06/2022 - 8h30	17,8
28/06/2022 - 8h15	18,1
29/06/2022 - 11h20	18,4
30/06/2022 - 9h15	17,9

4.3. MATERIAL DOS ELÉTRODOS

A variável seguinte a ser manipulada foi o material dos elérodos. Neste caso, verificou-se inicialmente que estavam utilizados elérodos de um material (AMPC095) de condução elétrica muito inferior ao material constituinte do porta-elérodos (AMPC0972). Esta diferença de condutividades representa um obstáculo para a passagem de corrente e, conseqüentemente, é uma fonte de desperdício energético. Idealmente, na soldadura por resistência devem existir apenas dois materiais: o material condutor (cobre) e o material a soldar, desta forma minimizam-se as interfaces e contribui-se para que a interface entre os materiais a soldar sejam as zonas de maior resistência e, conseqüentemente, as zonas de maior concentração de calor. Dado que os materiais aplicados nos elérodos e nos porta elérodos são diferentes, existe uma descontinuidade de material associada a uma segunda interface na qual se perde energia sob a forma de calor fenómeno que, associado ao facto de os elérodos apresentarem uma baixa condutividade térmica, contribui ainda para um desgaste prematuro destes consumíveis de soldadura devido ao seu maior aquecimento.

Em contrapartida, é importante referir que o material substituto adotado apresenta uma dureza inferior ao material originalmente aplicado, pelo que sofrerá mais desgaste provocado pelo impacto dos elérodos com os componentes a soldar e, conseqüentemente, apresentará um tempo de vida inferior. Este custo adicional não é considerado no âmbito da presente dissertação, estando esta focada no ganho energético. No entanto, referencia-se o balanço económico derivado da modificação dos elérodos,

incluindo o ganho energético e as diferenças nos custos quer do material quer advindas dos diferentes ciclos de vida como uma perspetiva de estudo futura.

Posto isto, efetuou-se um pedido de compra para elétrodos do material AMPCO972, cujas propriedades de interesse se encontram resumidas na tabela 15.

Tabela 15: Resumo das propriedades relevantes dos materiais aplicados nos elétrodos (fonte: catálogo AMPCOLOY).

	AMPCO 972 (1)	AMPCO 95 (2)
Composição química	98,8Cu 1Cr 0,1Zr	97,2Cu 0,5Be 2Co+Ni
Dureza Rockwell/ Brinell	78B/ 140	95B/ 240
Condutividade elétrica (%IACS)	78	45
Condutividade térmica (W/mK)	310	218

4.4. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERATÓRIOS DO PROCESSO

Uma vez implementados estes novos elétrodos, foi realizado um ajuste nos parâmetros operatórios, cujo objetivo principal consistiu na redução da corrente, tratando-se este do parâmetro com mais peso no consumo energético. Deste modo, planificou-se o seguinte conjunto de experiências:



Figura 15: Conjunto de experiências planificadas de modo a averiguar a melhor combinação de parâmetros para o processo modificado.

Pretendia-se inicialmente, para cada conjunto de parâmetros, produzir continuamente durante 1 hora, avaliando mediante ensaios de tração a qualidade de duas peças. No entanto, devido à crise que afetou a indústria automóvel nos primeiros meses de 2022 e às paragens da produção resultantes, o tempo disponível para o desenvolvimento do Design of Experiments foi significativamente inferior ao planeado e, como tal, foi necessário encurtar o leque de experiências a realizar (figura 28). Assim, numa segunda análise optou-se por se reduzir às experiências abaixo apresentadas. Para tal, tomou-se o critério de manter uma soldadura rápida que, como se detalhou no capítulo 2.7 apresenta melhores características e, assim, acompanhar a redução da corrente de soldadura com uma redução do tempo de soldadura.

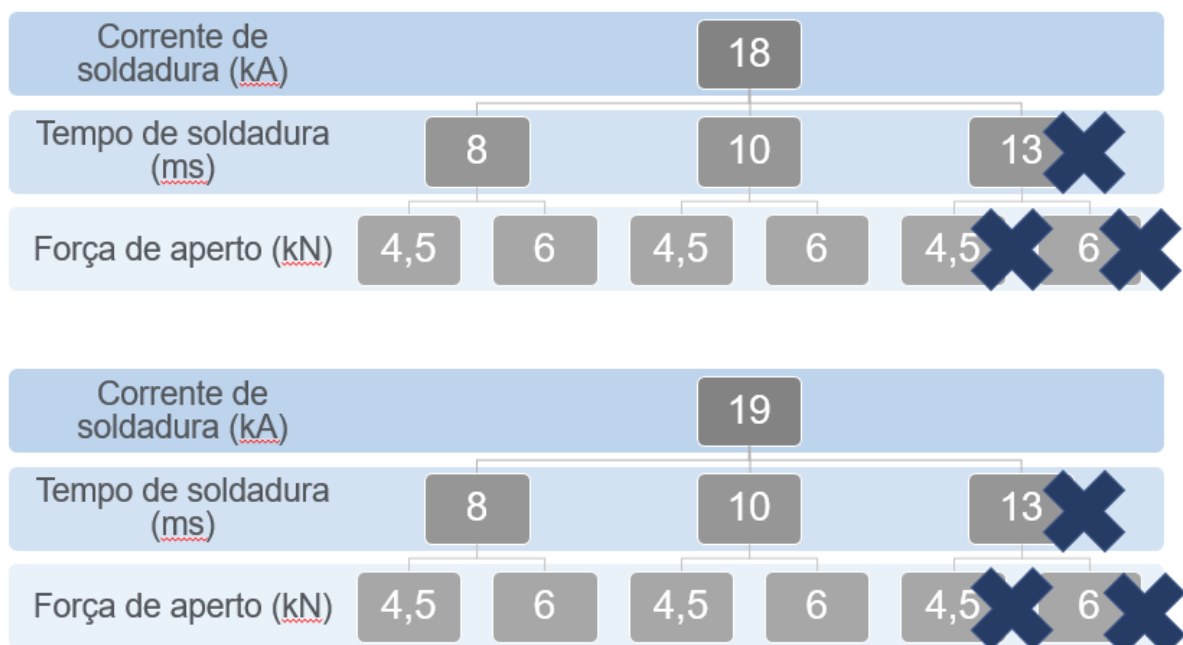


Figura 28: Conjunto de experiências planificadas adaptado após paragens produtivas advindas da crise de componentes.

As experiências realizadas para as forças de aperto de 4,5 kN, foram insatisfatórias uma vez que apresentavam muitas projeções. Como tal, optou-se por adotar uma força de aperto de 6 kN. Na tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tração para cada uma das peças testadas, sendo que a verde se encontra o conjunto de parâmetros pelo qual se optou.

Tabela 16: Resultados obtidos no estudo experimental.

Corrente (kA)	Tempo (ms)	Força (kN)	Resultados tração parafuso 1 (kN)	Resultado tração parafuso 2 (kN)
18	8	6	17,34	18,87
			15,72	14,42
	10	6	14,43	11,76
			16,12	17,64
19	8	6	16,29	15,83
			17,55	16,72
	10	6	17,70	18,16
			19,42	18,55

Os valores sombreados a verde foram finalmente adotados uma vez que, para além de não terem apresentado nos ensaios destrutivos nenhum valor abaixo do mínimo exigido pelo cliente, apresentam uma margem de segurança na ordem do que se pretendia (resultados dos ensaios por volta dos 18 kN). Na Tabela 17, encontram-se detalhados os programas de soldadura modificados para cada um dos parafusos de cada referência.

Tabela 17: Parâmetros atualizados após modificações aplicadas.

	Referência 1		Referência 2	
	Parafuso 1	Parafuso 2	Parafuso 1	Parafuso 2
Tempo de aproximação (ms)	10	10	10	10
Tempo de aperto (ms)	10	10	10	10
Tempo de soldadura (ms)	10	10	10	10
Corrente de soldadura (kA)	19	19	19	19
Tempo de arrefecimento (ms)	30	30	30	30
Número de impulsos	1	1	1	1
Força dos eléctrodos (kN)	6	6	6	6

Em suma, após aplicadas todas as modificações que se averiguaram viáveis, foram possíveis as reduções de parâmetros que se apresentam na tabela 18, sendo que a amarelo se destacam os parâmetros iniciais e a verde os parâmetros atualizados.

Tabela 18: Comparação dos parâmetros iniciais e modificados. após as intervenções realizadas.

	Referência 1		Referência 2	
	Iniciais	Modificados	Iniciais	Modificados
Tempo de aproximação (ms)	10	10	10	10
Tempo de aperto (ms)	10	10	10	10
Tempo de soldadura (ms)	13	10	13	10
Corrente de soldadura (kA)	22	19	24	19
Tempo de arrefecimento (ms)	20	30	20	30
Número de impulsos	1	1	1	1
Força dos elétrodos (kN)	4,5	6	5,5	6

Da análise da tabela 18, depreende-se que se reduziu o tempo de soldadura em 3 ms, a intensidade de corrente foi reduzida em 3 kA no caso da primeira referência e em 5 kA no caso da segunda referência. Esta modificação, em particular, era a que mais se ambicionava de modo a reduzir o input energético. O tempo de arrefecimento foi aumentado em 10 ms e a pressão dos elétrodos foi aumentada de maneira a potenciar o contacto entre os componentes a soldar.

4.5. MEDIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO FINAL

Finda a alteração dos parâmetros de soldadura, foi levado a cabo uma segunda medição do consumo energético com vista a avaliar o ganho energético e ainda económico advindo das modificações efetuadas no âmbito do projeto. Os resultados desta medição encontram-se resumidos na tabela 19.

Para tal, seguiu-se o mesmo procedimento adotado aquando da primeira medição. Recorrendo a um analisador de redes *Fluke* mediu-se, durante uma hora em contínuo o consumo energético (em kWh) da máquina. Neste caso, e uma vez que se igualaram os parâmetros de ambas referências, esta medição efetuou-se unicamente para uma referência e, como previamente definido, apenas para um turno. Adicionalmente, efetuaram-se três ensaios de tração (um por cada 20 minutos de ensaio) de modo a verificar a estabilidade do processo e, em particular, da qualidade da união, estando os resultados destes ensaios apresentados na tabela 20.

Tabela 19: Resultados da medição do consumo energético após atualização de parâmetros operatórios.

Data	Ref.	Turno	Duração	Nº Peças Produzidas	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/peça)
07/06/2022	2	Manhã	1h	238	2,716	0,0114

Tabela 20: Resultados dos ensaios de tração realizados durante o ensaio do consumo energético.

Referência	Parafuso 1	Parafuso 2
1	21,82 kN	20,36 kN
2	18,71 kN	20,52 kN
3	18,67 kN	19,80 kN

Depreende-se da análise da tabela 19, que o consumo por peça (em kWh) da máquina em consequência da alteração dos parâmetros operatórios passíveis de ser alterados foi de 0,0114, face aos 0,02346 da referência 1 no estado inicial e os 0,01861 da segunda referência. De forma resumida, apresenta-se na tabela 21 a comparação dos resultados do consumo energético antes e depois da intervenção levada a cabo no âmbito da presente dissertação.

Tabela 21: Comparação do consumo energético antes e depois da otimização os parâmetros de soldadura.

Referência	Consumo energético antes da otimização de parâmetros	Consumo energético após otimização de parâmetros	Diferença percentual
1	0,02346	0,0114	51,4 %
2	0,01861	0,0114	38,7 %

Como se verifica na tabela, conseguiu-se para a referência 1, uma diferença percentual no consumo energético de 51,3 %. Por sua vez, para a segunda referência, o ganho energético foi de 38,7 %.

Uma vez obtido o consumo energético, passou-se ao cálculo da poupança económica associada a esta redução energética.

Para tal, recorreu-se aos valores fixos de electricidades estabelecidos na fatura de maio de 2022. Este valor tornou-se ainda mais relevante perante o paradigma de guerra instalado na Europa que agravou os custos de electricidade. A média dos preços fixos anuais de electricidade na fatura da EDP de dezembro de 2021 era de 0,0502 €/kWh, por sua vez em janeiro de 2022 esta média era de 0,1816 €/kWh e em maio de 2022 era de 0,2084 €/kWh.

Tabela 22: Resultados dos custos energéticos associados ao processo de soldadura da referência 2 antes e depois da intervenção, segundo os custo fixo médio de electricidade da fatura de maio de 2022.

Custo Médio (€/kWh)	Consumo energético (kWh/peça)	Custo/peça (€/peça)	Volume Produção	Custo energético 2022	Ref.
0,2084	0,0234	0,004877	250000	1219,14	2
0,2084	0,0114	0,002376	250000	593,94	2

A poupança anual advinda da alteração dos parâmetros lograda com o projeto desenvolvido ao longo da presente dissertação foi de 625,20 € (com a referência 2).

Como referido, este valor triplicou as expetativas, em parte, devido ao agravamento dos custos de eletricidade que se verificaram no início do ano à luz da guerra instalada no leste europeu desde princípios do ano de 2022.

4.6. VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

De modo a averiguar a viabilidade dos resultados obtidos com o estudo desenvolvido no âmbito do projeto, fez-se um acompanhamento exaustivo das produções seguintes de modo a avaliar a prestação da junta soldada perante os novos parâmetros operativos. Para tal, para além de se aumentar a frequência de controlo da qualidade das referências em estudo, procedeu-se a um controlo mais apertado no que diz respeito aos ensaios destrutivos. Nas figuras 29 e 30, apresentam-se os gráficos com a os resultados obtidos nos ensaios de resistência à rotura realizados às referências 1 e 2, respetivamente, no mês de julho (após manipulação dos parâmetros operativos).

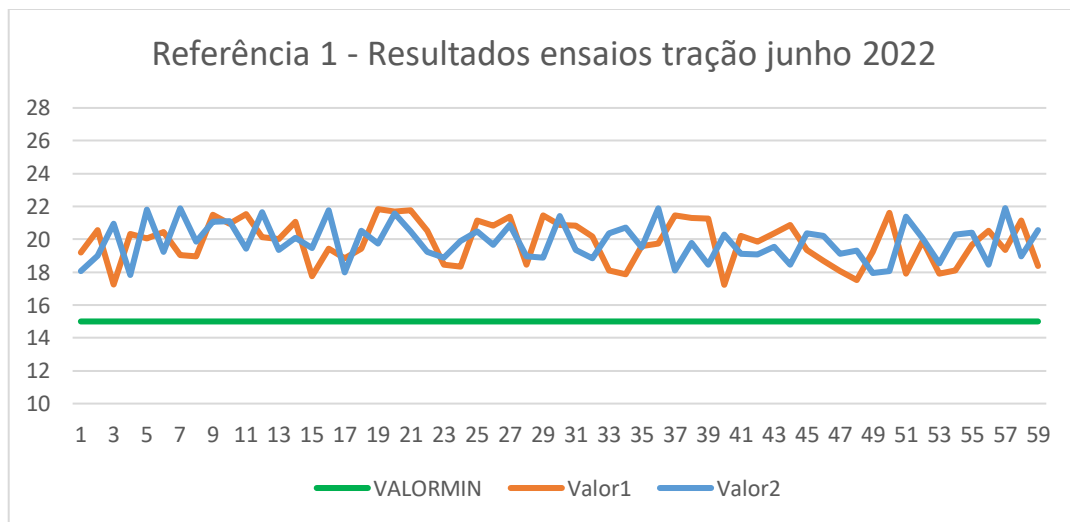


Figura 16: Monitorização dos resultados obtidos no mês de julho nos ensaios de tração da referência 1, em kN.

Por sua vez, nas tabelas 23 e 24 apresentam-se resumidas as informações mais relevantes representadas nos gráficos das figuras 29 e 30 (valor mínimo, valor máximo e valores médios dos parafusos 1 e 2, respetivamente).

Tabela 23: Resumo das informações mais relevantes retiradas do gráfico da figura 29.

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio 1	Valor Médio 2
17,04	21,93	19,77	19,49

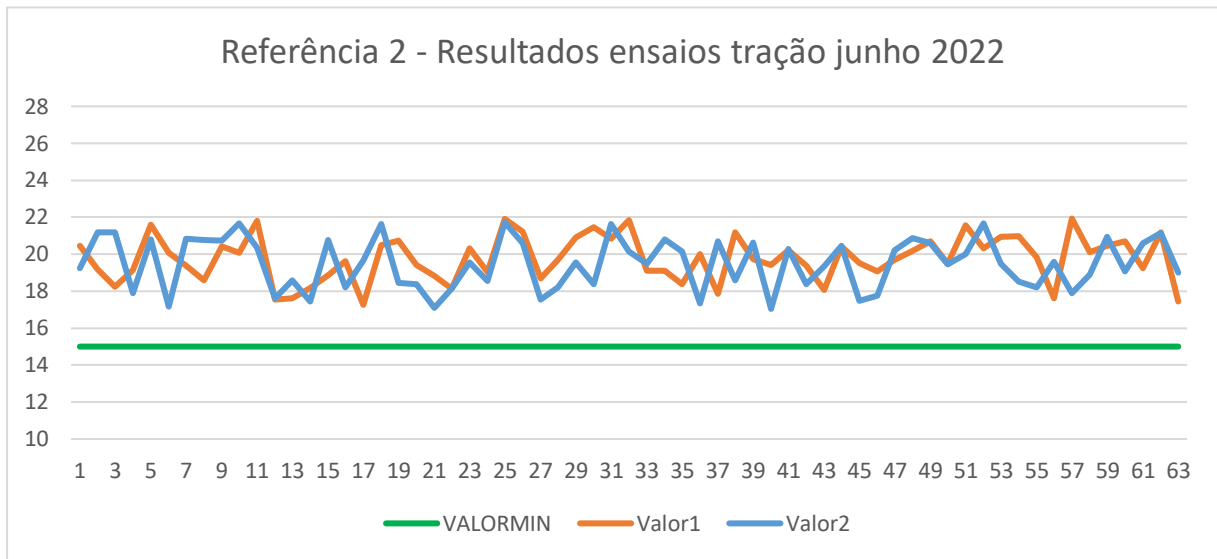


Figura 30: Monitorização dos resultados obtidos no mês de julho nos ensaios de tração na referência 2, em kN.

Tabela 24: Resumo das informações mais relevantes retiradas do gráfico da figura 30.

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio 1	Valor Médio 2
17,04	21,93	19,80	19,51

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos capítulos que se seguem, apresentam-se as conclusões e, ainda, as perspetivas de trabalho futuras.

5.1. CONCLUSÕES

Como referido inicialmente, o objetivo desta dissertação consistiu em, primeiramente estabilizar a grande variabilidade do processo de soldadura por resistência em estudo para, seguidamente, realizar uma otimização dos parâmetros (isto é, reduzir os parâmetros, de modo a reduzir o input energético assegurando sempre a qualidade do produto). Numa primeira caracterização do processo, identificaram-se as principais oportunidades de melhoria no processo. Posteriormente às intervenções realizadas, previu-se um Design of Experiments para levar a cabo a redução dos parâmetros.

A calendarização inicialmente definida previa três meses (abril, maio e junho) para a realização do Design of Experiments, no entanto, devido à crise de componentes que afetou a indústria automóvel nos primeiros meses do ano, levando à interrupção da produção, esta calendarização viu-se severamente atrasada, pelo que não se conseguiu dar a esta fase do projeto o desenvolvimento pretendido. Na tabela 25 apresenta-se a calendarização final, onde, a vermelho, se ilustram os prazos que não foram cumpridos e, a amarelo, os que tiveram a necessidade de ser alargados.

Tabela 25: Calendarização ajustada perante os atrasos imprevistos.

	Calendarização de Trabalhos a Realizar no Âmbito da Dissertação					
	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho
Caraterização do problema	Verde					
Recolha de dados	Verde	Verde	Amarelo			
Design of experiments: design	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo		
Design of experiments: execução			Vermelho	Vermelho	Verde	
Validação e conclusões					Verde	Verde
Redação da dissertação			Verde	Verde	Verde	Verde

Relativamente à estabilização do processo, o objetivo foi cumprido tendo-se reduzido significativamente a amplitude total dos resultados obtidos nos ensaios de tração assim como da média dos resultados destes ensaios tração. No anexo A, apresentam-se os resultados da monitorização dos

ensaios de tração ao longo do desenvolvimento do projeto, onde se verifica que a amplitude de resultados se reduziu de 18 kN em janeiro de 2022 a 6 kN em junho de 2022 (para a primeira referência). Verifica-se também que se conseguiu diminuir a média dos ensaios de tração de cerca de 22 kN a 19 kN. Estes valores, sendo satisfatórios, apresentam ainda margem de progresso.

Por sua vez, no que diz respeito ao objetivo principal do projeto – “otimização da eficiência energética do processo de soldadura de resistência em estudo” – o resultado foi também satisfatório tendo-se conseguido uma redução do consumo energético de 12 W/peça, o que totaliza um total anual de 3 MW de acordo com as previsões de consumo da referência em questão para 2022.

De maneira geral, apesar da volatilidade do mercado ter condicionado o desenvolvimento do projeto, o balanço geral foi muito positivo, com resultados que superaram as expectativas iniciais, sobretudo a nível económico que, devido ao agravamento dos preços energéticos que se presenciaram em 2022, tornou a redução energética ambicionada ainda mais relevante. Este projeto abriu ainda caminho para uma standardização metodológica passível de ser aplicada às restantes máquinas similares da unidade autónoma de produção 4 (UAP4), sendo que foi criado um grupo de trabalho interno com este intuito.

5.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

O projeto desenvolvido na presente dissertação teve como objetivo a otimização da eficiência energética de uma máquina de soldadura pedestal da unidade autónoma de produção 4 da *Gestamp Cerveira*. No entanto, a dita unidade de produção contempla um total de 19 máquinas de soldadura pedestais sendo que, uma vez definido o paradigma no que diz respeito à abordagem a tomar de modo a lograr a dita otimização energética, perspetiva-se para o futuro aplicar este procedimento às demais máquinas.

Por outro lado, neste projeto averiguou-se o ganho económico associado à redução energética aplicada na máquina, mas não foram tidos em conta os custos adicionais derivados, por exemplo, da mudança dos elétrodos. Como tal, uma segunda perspetiva de estudo prende-se com a realização do balanço económico do projeto realizado, tendo em conta todas as intervenções realizadas.

Finalmente, foram detetadas ao longo da realização deste trabalho outras potenciais variáveis passíveis de manipulação como, por exemplo, a abordagem das quatro peças estampadas num golpe máquina como referências distintas entre si. Apesar de, como referido, não se poder fazer uma segregação das peças à saída da máquina ao longo da produção série, seria interessante fazer esta separação numa produção única de modo a se levar a cabo o estudo do ganho energético que resultaria desta abordagem.

BIBLIOGRAFIA

Kolařík, L., Sahul, M., Kolaříková, M., Sahul, M., Turňa, M., & Felix, M. (2012). Resistance Spot Welding of dissimilar Steels. *Acta Polytechnica*, 52(3). <https://doi.org/10.14311/1548>

Prashanthkumar, V., Venkataram, N., Mahesh, N., & Kumarswami. (2014). Process Parameter Selection for Resistance Spot Welding through Thermal Analysis of 2mm CRCA Sheets. *Procedia Materials Science*, 5, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.279>

Sejč, P., Belanová, J., Gábrišová, Z., & Vanko, B. (2020). The influence of parameters of the resistance projection welding of M10 steel nuts to the galvanized steel sheet DP 600 on selected joint characteristics. *Manufacturing Technology*, 20(6), 822–833. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.090>

Shafee, S., Naik, B. B., & Sammaiah, K. (2015). Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2595–2604. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.215>

Summerville, C., Compston, P., & Doolan, M. (2019). A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. *Procedia Manufacturing*, 29, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.142>

ANEXO A: MONITORIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO AO LONGO DA PRIMEIRA METADE DO ANO DE 2022

Ao longo do período de realização do projeto desta dissertação, foram monitorizados os ensaios de tração realizados às referências em estudo. Conforme estava previsto na calendarização inicialmente definida, a alteração dos parâmetros (salvo as alterações que foram sendo realizadas ao longo do *design of experiments*) foi finalmente validada na primeira semana de junho (7/6/22), sendo que, com esta monitorização, se pretende averiguar a influência da manipulação das variáveis do processo nos resultados dos ensaios de tração. Nas figuras 31 a 40 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tração ao longo do primeiro semestre de 2022.

- REFERÊNCIA 1:

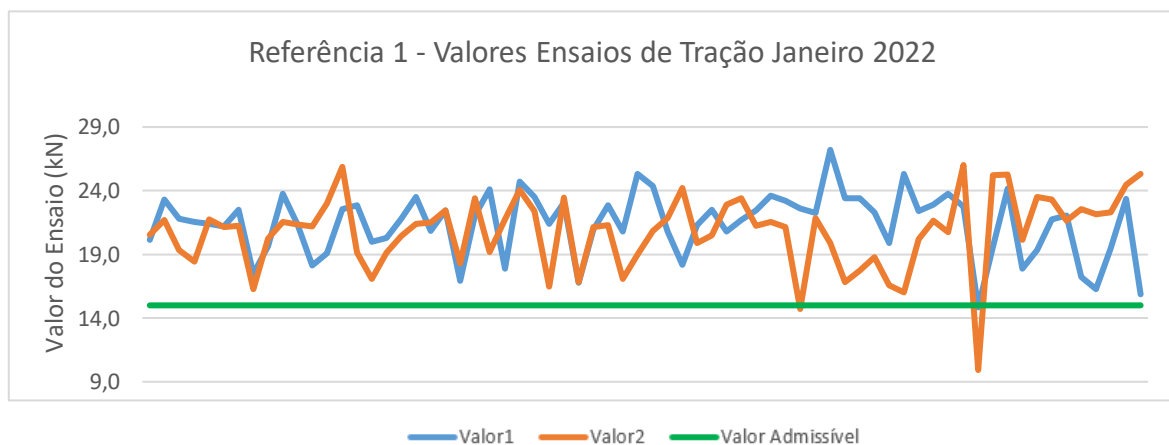


Figura 31: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em janeiro de 2022.

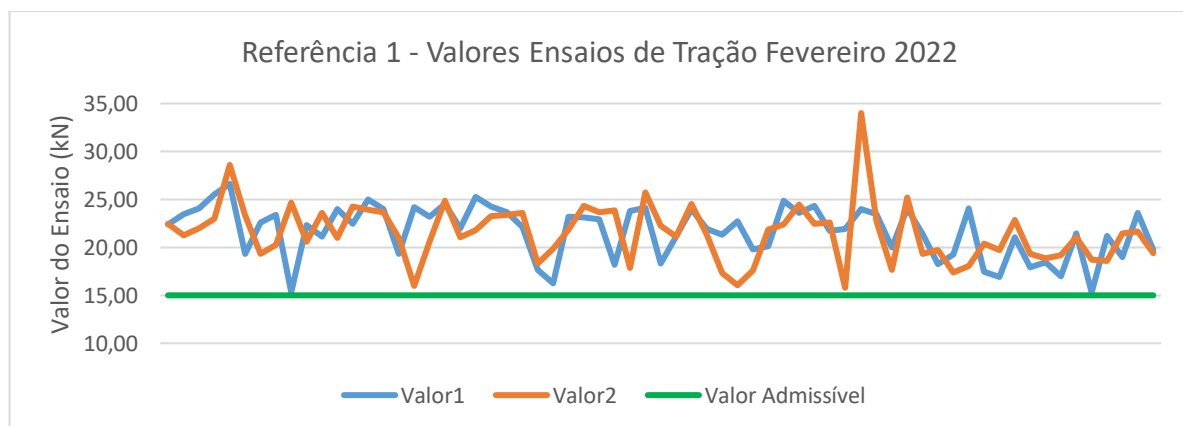


Figura 17: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em fevereiro de 2022

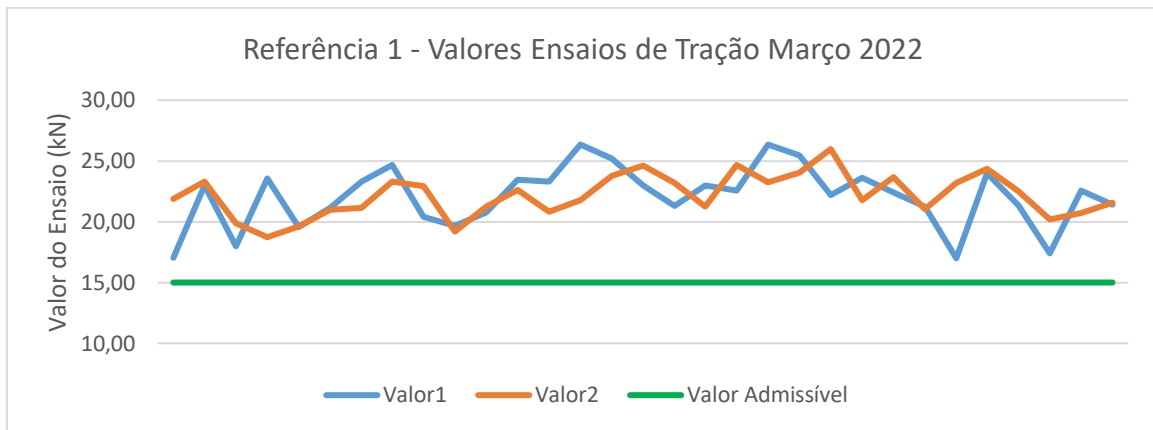


Figura 18: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 1 em março de 2022.

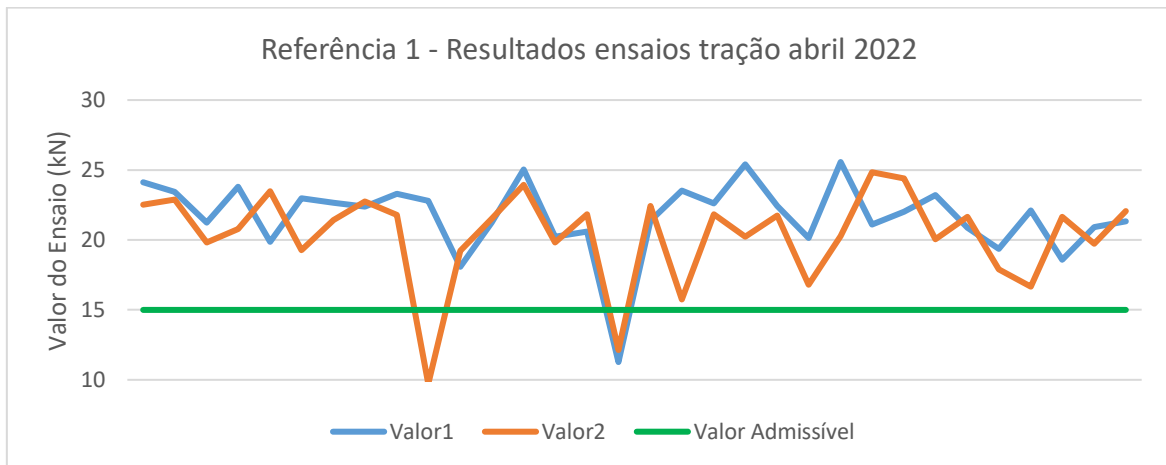


Figura 19: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em abril de 2022.

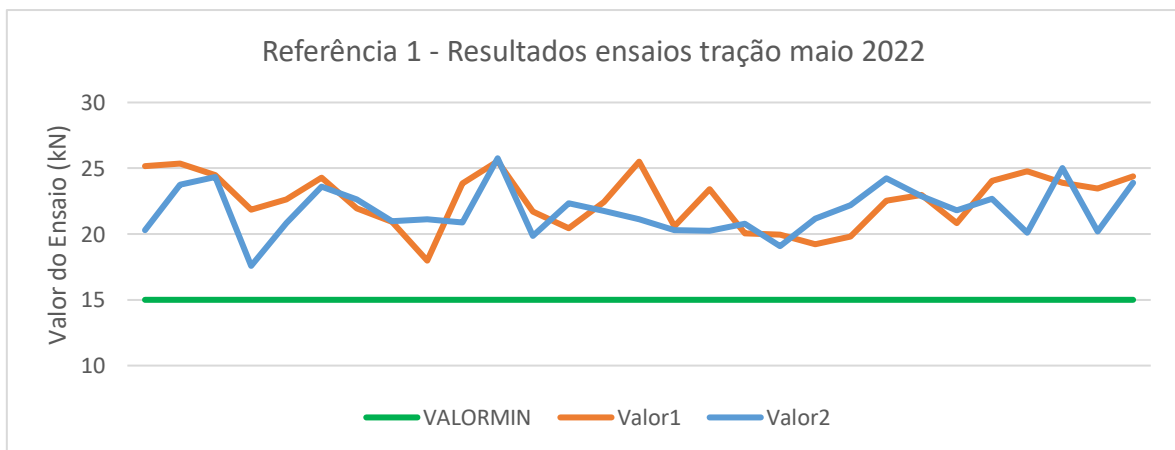


Figura 20: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em maio de 2022.

- REFERÊNCIA 2:

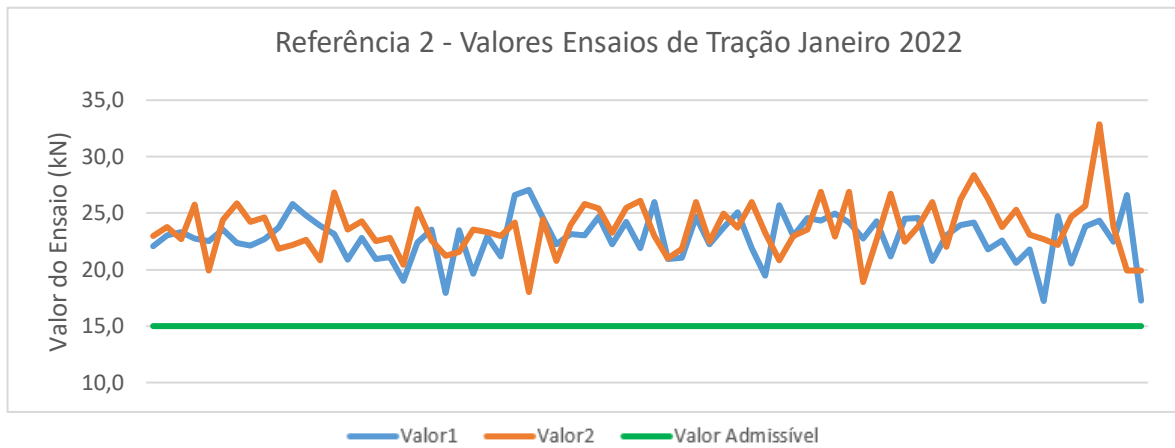


Figura 21: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em janeiro de 2022.

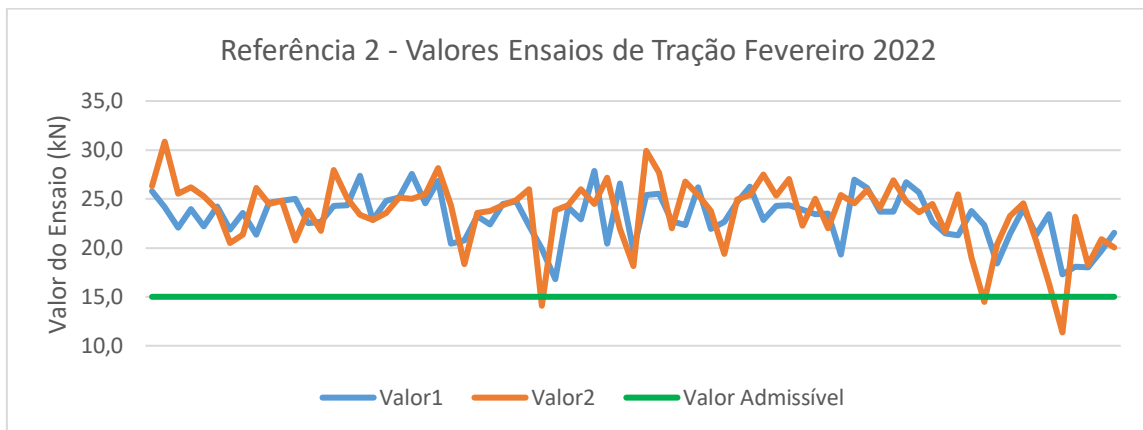


Figura 22: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em fevereiro de 2022.

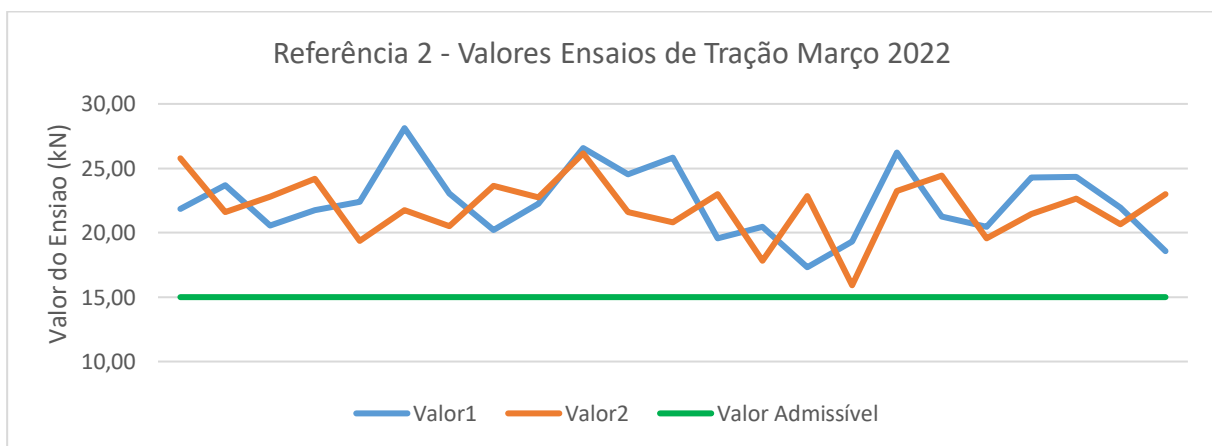


Figura 23: Resultados dos ensaios de tração realizados à referência 2 em março de 2022.

Tabela 26: Valores mínimos, máximos e médios obtidos nos ensaios de tração da referência 1 no primeiro semestre de 2022.

Mês	Valor Mínimo (kN)	Valor Máximo (kN)	Valor Médio (Parafuso 1)	Valor Médio (Parafuso 2)
Janeiro	9,92	27,21	21,4	20,8
Fevereiro	15,30	34,02	21,67	21,51
Março	16,99	26,35	22,17	22,23
Abril	9,71	25,57	21,67	20,34
Mai	17,58	25,76	22,55	21,77
Junho	16,75	22,87	20,07	19,83

Tabela 27: Valores mínimos, máximos e médios obtidos nos ensaios de tração da referência 2 no primeiro semestre de 2022.

Mês	Valor Mínimo (kN)	Valor Máximo (kN)	Valor Médio (Parafuso 1)	Valor Médio (Parafuso 2)
Janeiro	17,22	32,87	22,86	23,66
Fevereiro	11,36	30,85	23,20	23,56
Março	15,92	28,12	22,40	22,00
Abril	10,53	25,5	21,92	19,33
Mai	16,98	26,49	22,29	21,98
Junho	17,23	21,90	19,79	19,84