



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ PEREIRA DA COSTA NETO

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ULTRASSOM EM  
COMPONENTES DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Recife

2022

LUIZ PEREIRA DA COSTA NETO

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ULTRASSOM EM  
COMPONENTES DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

C838e

Costa Neto, Luiz Pereira da.

Estudo e avaliação do processo de soldagem por ultrassom em componentes da indústria automotiva / Luiz Pereira da Costa Neto. – 2022.

82 f.: il., fig., gráf., tab. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2022.

Inclui referências e anexos.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem ultrassônica. 3. Componentes automotivos. 4. Parâmetros de soldagem. 5. Resistência à tensão de cisalhamento.  
I. Araujo Filho, Oscar Olimpio de (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-12

LUIZ PEREIRA DA COSTA NETO

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ULTRASSOM EM  
COMPONENTES DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Aprovada em: 05/12/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Mauricio David Martins das Neves  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

A Deus, por me proporcionar concluir esta grande etapa da minha carreira e a minha família, por todo apoio e motivação para superar os obstáculos durante essa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela saúde e força para adquirir condições e sabedoria para a conclusão desta etapa de vida.

A minha esposa Mariana Costa e ao meu filho Luiz Miguel Costa, por todo apoio e motivação para conclusão deste e de todos os momentos da minha vida. Tudo isso é e sempre será por vocês!

A minha mãe Ivana Sheila da Costa pela educação e pela orientação do quão importante é o estudo em minha vida.

A todos os parentes, que durante toda a minha vida sempre me incentivaram e estimularam a estudar e me confiaram todas as ferramentas e formas para que eu pudesse sempre me desenvolver e estudar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho, por ter me aceitado como orientando, por ter me guiado ao longo do curso com grande maestria e por ter proporcionado as condições necessárias para realização e conclusão deste projeto.

A todos os amigos que fiz durante todo curso de mestrado e estiveram presentes em todos os momentos. Em especial ao meu amigo Moisés Euclides, que desde o meu primeiro ciclo de mestrado sempre me ajudou e nunca mediu esforços para me ajudar e incentivar a regressar ao programa e concluir o mestrado.

A UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, ao DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica, ao PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, ao INTM – Instituto Nacional de Tecnologia de Materiais e a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pelo período de convívio e aprendizado.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal entender a influência da oxidação nos fios de cobre e os seus impactos em materiais soldados por meio do processo ultrassônico em componentes automotivos. 42 amostras de cobre foram extraídas e subdivididas em 7 grupos com 6 amostras cada um para o experimento, onde o primeiro grupo contou com amostras sem oxidação e os outros grupos têm amostras que foram envelhecidas em 15, 30, 60, 90, 180 e 360 dias. Estas amostras foram soldadas pelo processo ultrassom com parâmetros que garantiram os requisitos mínimos de soldabilidade, que são os critérios visual e de união completa dos 7 filamentos de cobre na junta. Após isso, os materiais soldados foram submetidos a validação da soldagem por meio de medição da força de resistência de cisalhamento tipo *peeling* para garantir o atendimento aos requisitos mínimos exigidos por norma interna. As amostras sem oxidação atenderam aos parâmetros de engenharia e resultaram nos maiores valores de resistência à tração de cisalhamento. A energia de soldagem aumentou proporcionalmente para os grupos 02 e 03 (15 e 30 dias de oxidação) e se estabilizou para os outros grupos. Com a ampliação da energia de soldagem, a resistência a tensão de cisalhamento dos grupos caiu proporcionalmente, com o grupo 07 (360 dias de oxidação) apresentando 1 amostra que ficou abaixo do parâmetro mínimo (10 N), medido em dinamômetro e estabelecido por norma para valor mínimo de força de resistência ao cisalhamento. Em suma, todos os 7 grupos apresentaram resultados satisfatórios de força de resistência à tensão de cisalhamento, superiores a 10 N.

Palavras-chave: soldagem ultrassônica; componentes automotivos; parâmetros de soldagem; resistência à tensão de cisalhamento.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to understand the influence of oxidation on copper wires and its impacts on materials welded through the ultrasonic process in automotive components. 42 copper samples were extracted and subdivided into 7 groups with 6 samples each for the experiment, where the first group had samples without oxidation and the other groups have samples that were aged in 15, 30, 60, 90, 180 and 360 days. These samples were welded by the ultrasonic process with parameters that ensured the minimum requirements for weldability, which are the visual and complete union criteria of the 7 copper filaments in the joint. After that, the welded materials underwent welding validation by measuring the peeling-type shear strength to ensure compliance with the minimum requirements required by internal standards. The samples without oxidation met the engineering parameters and resulted in the highest shear tensile strength values. Welding energy increased proportionally for groups 02 and 03 (15 and 30 days of oxidation) and stabilized for the other groups. With the increase in welding energy, the resistance to shear stress of the groups fell proportionally, with group 07 (360 days of oxidation) presenting 1 sample that was below the minimum parameter (10 N), measured in a dynamometer and established by standard for minimum value of shear strength. In short, all 7 groups showed satisfactory results of resistance to shear stress, greater than 10 N.

Keywords: ultrasonic welding; automotive components; welding parameters; shear stress strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem.....	21
Figura 2 - Representação do processo FRW: (a) rotação rápida de uma das peças, (b) aplicação de pressão, (c) deformação plástica e (d) recalque final.....	26
Figura 3 - Equipamento de soldagem ultrassônica.....	35
Figura 4 – Amostra de fios de cobre na Indústria automotiva.....	40
Figura 5 – Características construtivas das amostras .....	41
Figura 6 – Máquina de solda utilizada no experimento.....	43
Figura 7 – Representação esquemática ensaio de tração <i>peeling</i> .....	44
Figura 8 – Dinamômetro Starrett FFM 550-X .....	45
Figura 9 - Visão esquemática microscópio de bancada.....	46
Figura 10 – Macrografia grupo 01 .....	64
Figura 11 - Macrografia grupo 02 .....	65
Figura 12 - Macrografia grupo 03 .....	66
Figura 13 - Macrografia grupo 04 .....	67
Figura 14 - Macrografia grupo 05 .....	68
Figura 15 - Macrografia grupo 06 .....	69
Figura 16 - Macrografia grupo 07 .....	70

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Parâmetros de soldagem após procedimento experimental.....	47
Gráfico 2 – Parâmetro energia de soldagem após procedimento experimental .....	48
Gráfico 3 – Parâmetro tempo de soldagem após procedimento experimental .....	50
Gráfico 4 – Parâmetro pressão de soldagem após procedimento experimental .....	52
Gráfico 5 – Parâmetro amplitude após procedimento experimental .....	54
Gráfico 6 – Média dos resultados do ensaio de tração após procedimento experimental .....	56
Gráfico 7 – Resultados do ensaio de tração – materiais sem oxidação .....	56
Gráfico 8 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 15 dias de oxidação .....	57
Gráfico 9 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 30 dias de oxidação .....	58
Gráfico 10 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 60 dias de oxidação .....	59
Gráfico 11 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 90 dias de oxidação .....	60
Gráfico 12 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 180 dias de oxidação .....	61
Gráfico 13 – Resultados do ensaio de tração – materiais com 360 dias de oxidação .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do cobre .....	17
Tabela 2 - Tipo de minério de cobre, percentual teórico e estrutura atômica .....	18
Tabela 3 - Parâmetros de engenharia para soldagem dos fios de cobre 0,35 mm <sup>2</sup> (total: 1,05 mm <sup>2</sup> ) .....	43
Tabela 4 – Características construtivas e operacionais Dinamômetro Starrett FFM 550-X ....	45
Tabela 5 - Informações técnicas Microscópio ML 3700.....	46

## LISTA DE SIGLAS

AWS	Sociedade Americana de Soldagem
GMAW	Soldagem a Arco Elétrico MIG/MAG
GTAW	Soldagem a Arco Elétrico TIG
LBW	Soldagem a Laser
SMAW	Soldagem a Arco Elétrico por Eletrodo Revestido
USW	Soldagem Ultrassônica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
4.1 COBRE.....	17
4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM .....	19
<b>4.2.1 Conceito de soldagem</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2.2 Processos de soldagem por fusão</b> .....	<b>21</b>
4.2.2.1 Soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido (SMAW) .....	21
4.2.2.2 Soldagem a arco elétrico <i>Metal Inert Gas</i> ou <i>Metal Active Gas</i> (GMAW) .....	22
4.2.2.3 Soldagem a <i>laser</i> (LBW).....	23
<b>4.2.3 Processos de soldagem por deformação</b> .....	<b>25</b>
4.2.3.1 Soldagem por fricção convencional (FRW) .....	25
4.2.3.2 Soldagem por explosão (EXW).....	28
4.2.3.3 Soldagem a frio (CW).....	30
4.2.3.4 Soldagem por laminação .....	30
<b>4.2.4 Soldagem na indústria automotiva</b> .....	<b>31</b>
4.2.4.1 Soldagem por ultrassom (USW).....	32
4.2.4.1.1 <i>Mecanismo da soldagem por ultrassom (USW)</i> .....	36
4.3 ENSAIO VISUAL .....	38
<b>5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
5.1 MATERIAIS .....	40
5.2 MÉTODOS .....	41
<b>5.2.1 Procedimento de envelhecimento</b> .....	<b>41</b>
<b>5.2.2 Procedimento de soldagem ultrassônica</b> .....	<b>42</b>
<b>5.2.3 Ensaio de tração</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2.4 Ensaio visual</b> .....	<b>45</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
6.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM ULTRASSÔNICA .....	47

<b>6.1.1 Energia de soldagem .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1.2 Tempo de soldagem.....</b>	<b>49</b>
<b>6.1.3 Pressão de soldagem.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1.4 Amplitude.....</b>	<b>53</b>
<b>6.2 ENSAIO DE FORÇA TRACÇÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6.2.1 Grupo 01 – materiais sem oxidação.....</b>	<b>56</b>
<b>6.2.2 Grupo 02 – materiais com 15 dias de oxidação .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2.3 Grupo 03 – materiais com 30 dias de oxidação .....</b>	<b>58</b>
<b>6.2.4 Grupo 04 – materiais com 60 dias de oxidação .....</b>	<b>59</b>
<b>6.2.5 Grupo 05 – materiais com 90 dias de oxidação .....</b>	<b>60</b>
<b>6.2.6 Grupo 06 – materiais com 180 dias de oxidação .....</b>	<b>61</b>
<b>6.2.7 Grupo 07 – materiais com 360 dias de oxidação .....</b>	<b>62</b>
<b>6.3 ENSAIO VISUAL.....</b>	<b>63</b>
<b>6.3.1 Grupo 01 – materiais sem oxidação.....</b>	<b>63</b>
<b>6.3.2 Grupo 02 – materiais com 15 dias de oxidação .....</b>	<b>64</b>
<b>6.3.3 Grupo 03 – materiais com 30 dias de oxidação .....</b>	<b>65</b>
<b>6.3.4 Grupo 04 – materiais com 60 dias de oxidação .....</b>	<b>66</b>
<b>6.3.5 Grupo 05 – materiais com 90 dias de oxidação .....</b>	<b>67</b>
<b>6.3.6 Grupo 06 – materiais com 180 dias de oxidação .....</b>	<b>68</b>
<b>6.3.7 Grupo 07 – materiais com 360 dias de oxidação .....</b>	<b>69</b>
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO A – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 30 DIAS .....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO B – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 60 DIAS .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO C – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 90 DIAS .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO D – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 180 DIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO E – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 360 DIAS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem está presente em diversos segmentos industriais, sendo muito responsável pelo incremento tecnológico nas indústrias. O volume de processos de soldagem aplicados industrialmente tem uma evolução formidável, onde mais de 80 processos são utilizados atualmente. Nos últimos anos, novos processos de alta complexidade de união tem sido desenvolvidos, com destaque para processos não convencionais de soldagem com objetivo de solucionar problemas de união de materiais em que os processos convencionais não têm grande impacto (DEHELEAN e OANCA, 2009).

Um processo que tem grande destaque nesse advento é a soldagem ultrassônica (USW). Grande parte da evolução deste processo deve-se aos fatos que este processo possibilita a junção de materiais delgados a espessos, permite a união de materiais dissimilares com eficácia, utiliza energia de forma eficiente e não usa materiais de adição ou atmosfera protetora especial (AWS, 1993).

Um segmento industrial que se desenvolveu por meio da evolução dos processos de soldagem foi o automotivo. Diversos processos de soldagem são utilizados na fabricação e montagem dos veículos, tanto para a parte estrutural quanto periférica dos veículos. Como exemplos, para a fabricação das carrocerias, fabricação de faróis, painéis e os chicotes elétricos, utiliza-se diversos processos convencionais e não-convencionais para unir diversos tipos de materiais, como metais, plásticos, alumínio, cobre etc.

O cobre está presente nos automóveis, principalmente na parte elétrica/eletrônica. Por ter sido um dos primeiros materiais a ser descoberto e trabalhado pelo Homem, o cobre tem diversas aplicações em alguns segmentos, sobretudo no tocante a energia elétrica e térmica. Esta presença é motivada devido ao cobre ser ótimo condutor de calor e eletricidade, ser flexível e barato (RODRIGUES *et al.*, 2012).

Neste contexto, o referido trabalho discute sobre o impacto da oxidação do cobre no resultado do processo de soldagem ultrassônica para a construção de produtos elétricos para o segmento automotivo, principalmente no tocante a redução da resistência mecânica da solda, influência nos parâmetros de soldagem e incremento no número de *scrap* de materiais com potencial de utilização.

## 2 OBJETIVOS

Neste capítulo são apresentados os objetivos gerais e específicos abordados no estudo.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é identificar o tempo máximo que o fio de cobre pode estar em exposição à oxidação sem comprometer os resultados do processo de soldagem ultrassônica na qualidade da emenda sem prejuízo as características principais do produto acabado.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as diferenças e influências dos parâmetros de soldagem (energia de soldagem, tempo de soldagem, pressão e amplitude) em material sem oxidação e materiais com até 1 ano de oxidação do cobre;
- Validação do tempo máximo em que o cobre pode ficar exposto sem comprometer o resultado e a qualidade do produto final;
- Verificar a influência da oxidação do cobre na superfície do fio;
- Comparar as características e propriedades do cobre sem oxidação e com até um ano de oxidação;
- Determinar tempo ideal de armazenagem dos fios de cobre no Kanban sem comprometer sua qualidade e soldabilidade.

### 3 JUSTIFICATIVA

Anualmente, as fornecedoras de chicotes elétricos para automóveis têm um grande número de material segregado para descarte devido à influência do tempo e, com isso, a oxidação dos fios de cobre que estão armazenados em estoques intermediários (*Kanban*). Esse descarte na forma de sucata causa bastante prejuízo aos cofres das empresas. Com isso, a justificativa para este trabalho é a busca por encontrar parâmetros de soldagem que forneçam a possibilidade da utilização de materiais oxidados e, por consequência, atuar na redução da quantidade de material íntegro que é destinado na forma de material sucateado (*scrap*), garantindo que a oxidação do cobre não interfere na qualidade do produto acabado.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados o conhecimento teórico para desenvolvimento e conclusão do estudo.

### 4.1 COBRE

O cobre foi, possivelmente, o primeiro material descoberto e trabalhado pelo homem. Estima-se que esta descoberta aconteceu há mais de 7.000 anos e, com isso, houve um progresso para a evolução das civilizações mais antigas. Na natureza, o cobre é encontrado principalmente nos minerais calcocita, calcopirita e malaquita, estando também presente no mineral conhecido como turquesa. Na atualidade, o cobre ainda é um elemento bastante importante no desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente nos segmentos eletrônicos e automotivo. A Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades do cobre (RODRIGUES *et al.*, 2012). Na tabela 02 é apresentado um resumo com os principais minérios, teor de cobre em cada uma destas formas e a microestrutura dominante.

Tabela 1 - Propriedades do cobre

<b>Propriedades</b>	<b>Valores de Referência</b>
Ponto de Fusão	1.080°C
Peso específico	8,9g/cm <sup>3</sup>
Condutividade elétrica	95% IACS
Condutividade térmica a 25°C	0,94 cal/cms°C
Limite de resistência a tração	290 MPa

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2012); Metais (2021)

Tabela 2 - Tipo de minério de cobre, percentual teórico e estrutura atômica

<b>Tipo</b>	<b>Mineral</b>	<b>Fórmula</b>	<b>% Teórico de Cu</b>	<b>Estrutura</b>
Sulfeto	Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	35	Tetragonal
	Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63	Ortorrômbica
	Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,8	Ortorrômbica, Hexagonal
Óxido	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8	Cúbica de corpo centrado
	Tenorita	$\text{CuO}$	79,9	Monoclínica
Carbonato	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	58	Monoclínica
	Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55	Monoclínica

Fonte: Adaptado de Silva (2019)

Na atualidade, os processos hidro metalúrgicos e piro metalúrgicos (uso de altas temperaturas para a obtenção do metal livre) são as formas mais comuns de obtenção do cobre. O cobre extraído através de processos piro metalúrgicos necessitam de purificação por eletrólise para ter a capacidade de utilização em aplicações elétricas, visto que as impurezas reduzem consideravelmente a condutividade elétrica do material. Para a execução do processo de eletrólise, é utilizado cobre impuro como ânodo e cobre puro como cátodo em uma solução de ácido sulfúrico contendo íons cobre (RODRIGUES *et al.*, 2012).

Os principais produtores mundiais de cobre são os Estados Unidos, Peru, China, Austrália, Indonésia e Chile, sendo este o detentor da maior reserva mineral deste metal. O Brasil, em função do grande crescimento da economia nos últimos tempos, em especial para os setores automotivo, construção civil e eletrodomésticos, é um grande importador de cobre (RODRIGUES *et al.*, 2012).

Como características principais do cobre, pode-se destacar a sua ductilidade, maleabilidade e sua coloração avermelhada. A sua configuração eletrônica é  $3d^{10}4s^1$ . Como número de oxidação, o cobre pode assumir a valência ou número de oxidação (NOx) de +1 ( $\text{CuCl}$ ), +2 ( $\text{CuCl}_2$ ) e +3 ( $\text{K}_3\text{CuF}_6$ ). Os níveis de oxidação +1 e +2 podem ser encontrados em solução aquosa. O estado de oxidação +2 é o mais comum, e o +3 é bastante raro, ocorrendo apenas em alguns poucos compostos que geralmente são fortes agentes oxidantes (RODRIGUES *et al.*, 2012). Em geral, sais de cobre +1 são insolúveis, diamagnéticos e de cor branca; os sais de cobre +2 tendem a ser solúveis, paramagnéticos e coloridos (Lee, 2000).

Após descoberta de Faraday sobre gerador elétrico (1831), o cobre tornou-se um metal imprescindível para o desenvolvimento industrial e, desde então, sua produção expandiu de forma global. Na atualidade, a principal utilização do cobre dá-se nos equipamentos e sistemas elétricos, com destaque para geradores, transformadores, fios, cabos, conectores de

aterramento, entre outros. Este grande campo de utilização é devido as suas propriedades (ótimo condutor térmico e elétrico, flexibilidade, relativamente barato e muito resistente à corrosão (RODRIGUES *et al.*, 2012).

## 4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Neste capítulo são apresentados conhecimentos específicos sobre processos de soldagem.

### 4.2.1 Conceito de soldagem

Atualmente, são utilizados dois grandes métodos para união entre metais: um método é baseado no surgimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas. Este método tem como grandes representantes a parafusagem e a rebitagem, onde nestes processos a resistência da união é medida através da resistência ao cisalhamento do parafusou ou rebite. O segundo método é baseado no surgimento de forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). Os principais representantes desse método de união é a soldagem e a brasagem. Neste, a união entre os materiais é obtida através da aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals (MARQUES *et al.*, 2011).

De acordo com a *American Welding Society* (AWS, 1993), soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.

Um número expressivo de diferentes processos que são utilizados na fabricação e recuperação de peças, estruturas e equipamentos são abrangidos pelo termo soldagem. Por definição clássica, a soldagem é considerada como um método de união, entretanto, muitos processos de soldagem ou variações deste são usados para a deposição de material sobre uma superfície, com objetivo de recuperar parte destas peças que sofreram algum tipo de desgaste ou para formação de um revestimento com características especiais (MARQUES *et al.*, 2011).

Alguns autores construíram algumas definições de soldagem:

- “Processo de união localizada de metais ou não-metais, por meio da fusão ou não das peças”. Atualmente já é sabido que materiais não metálicos também

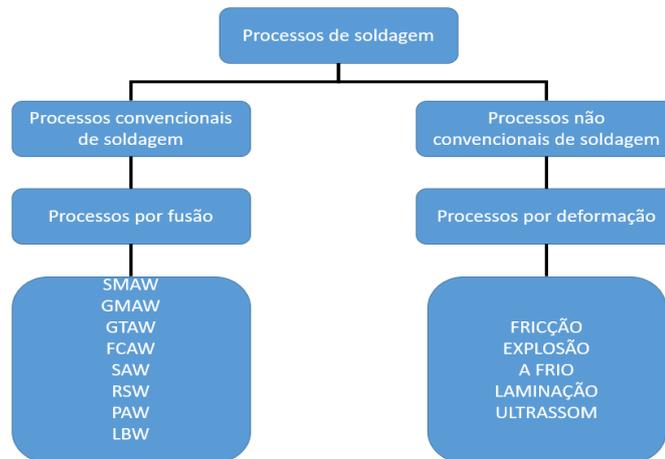
são passíveis de soldagem e que também existem processos que soldam metais sem fusão (MACHADO, 1996).

- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas” (MARQUES *et al.*, 2011).
- “Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição” (AWS *apud* MARQUES, 2011).
- “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais” (MARQUES *et al.*, 2011).
- “Processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão” (WAINER *et al.*, 2002).

Os critérios utilizados para determinar o melhor processo de soldagem para determinada aplicação leva em consideração os requisitos do projeto, as características físicas e geométricas do material e o grau de mecanização desejado. A partir disso, um processo de soldagem é conceituado pela fonte de calor, quantidade de calor trocado e o tipo de proteção à solda.

Devido ao grande número de processos de soldagem, estes foram subdivididos em dois macro grupos: processos de soldagem por fusão e processos de soldagem em estado sólido (ou por deformação) (MARQUES *et al.*, 2011). Na figura 01 é apresentado um esquema que diferencia em função do tipo de processo e sua aplicação cotidiana.

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem



Fonte: O Autor (2022)

#### 4.2.2 Processos de soldagem por fusão

Os processos convencionais de soldagem recebem essa designação por serem processos de soldagem aplicados em grande escala. Como principais representantes dessa categoria, estão englobados os processos de soldagem por fusão. A soldagem por fusão é um processo de união que usa a fusão do metal de base para fazer a solda (KOU, 2003). Os principais tipos de processos de soldagem por fusão são a soldagem oxiacetilênica, eletrodo revestido (SMAW), MIG/MAG (GMAW), TIG (GTAW), entre outros processos.

##### 4.2.2.1 Soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido (SMAW)

É um processo de soldagem manual em que um arco é gerado entre um eletrodo consumível coberto por fluxo (revestimento) e a peça de trabalho. O processo usa a decomposição do revestimento para gerar um gás de proteção e fornecer elementos de fluxo para proteger as gotículas de metal fundido e a poça de fusão. (ASM, 1993)

O arco é iniciado tocando ou "arranhando" momentaneamente o eletrodo no metal base. O arco resultante derrete o metal base e a ponta do eletrodo de soldagem. O metal / fluxo do eletrodo fundido é transferido através do arco (pelas forças do arco) para a poça de metal base, onde se torna o depósito de solda coberto pela escória protetora menos densa da cobertura do eletrodo. (ASM, 1993)

Algumas vantagens desse processo é que ele é o mais simples em termos de requisitos de equipamento, mas é, talvez, o mais difícil em termos de treinamento de soldador e requisitos de nível de habilidade; os eletrodos de soldagem (exceto os metais muito reativos, como titânio, magnésio e outros) estão disponíveis para praticamente todas as aplicações de fabricação, construção ou manutenção; tem a maior flexibilidade de todos os processos de soldagem, pois pode ser usada em todas as posições (plana, vertical, horizontal e aérea), com praticamente todas as espessuras de metais básicos; é capaz de ser executada em áreas de acessibilidade limitada. (ASM, 1993)

Como limitações, pode-se destacar a baixa produtividade, devido ao processo ser totalmente manual; a qualidade do processo está diretamente ligada à habilidade do soldador; é necessário boa limpeza da região para garantia de boa qualidade da junta soldada (ASM, 1993).

#### 4.2.2.2 Soldagem a arco elétrico *Metal Inert Gas* ou *Metal Active Gas* (GMAW)

É um processo de soldagem a arco que une metais, aquecendo-os com um arco elétrico que é estabelecido entre um eletrodo consumível (fio) e a peça de trabalho. Um gás fornecido externamente (ou mistura de gases) atua protegendo o arco e a poça de fusão fundida. (ASM, 1993)

Neste processo, podem ser utilizados dois tipos de gases de proteção: os gases inertes (ou processo MIG), que não participam da mistura na poça de fusão (Argônio e Hélio ou mistura entre os dois) e os gases ativos (ou processo MAG), que tem participação da mistura na poça de fusão (CO<sub>2</sub> ou mistura entre Argônio + CO<sub>2</sub>). (MARQUES *et al.*, 2011, p. 235)

Este processo normalmente é semiautomático, onde a alimentação do arame eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pelo início e interrupção do processo, além de mover a tocha ao longo da junta soldada. A manutenção do arco elétrico é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independente da habilidade do soldador. (MARQUES *et al.*, 2011, p. 235)

A soldagem GMAW pode ser utilizada em materiais em uma grande faixa de espessura, tanto em metais ferrosos como metais não ferrosos, onde o processo MAG só pode ser utilizado com metais ferrosos e o processo MIG pode ser usado com metais ferrosos e não ferrosos. (MARQUES *et al.*, 20, p. 235)

Se comparado ao processo por eletrodo revestido, o processo GMAW tem as seguintes vantagens: alta taxa de deposição e alto fator de ocupação do soldador; grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis; não existência de fluxos de soldagem. Além disso, em função do seu aumento de produtividade e a versatilidade da produção soldada devido ao seu caráter semiautomático decorrente da contínua alimentação do arame eletrodo que facilita a automatização do processo e o coloca em posição de destaque dentre os processos de fabricação utilizados na indústria metalmeccânica (MARTIM e VILARINHO, 2020), Como limitação, pode-se destacar que este processo é mais sensível à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco elétrico, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado, além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros de soldagem. (MARQUES *et al.*, 2011, p. 235; SOUZA *et al.*, 2020) A figura 03 representa uma visão esquemática do processo GMAW.

#### 4.2.2.3 Soldagem a *laser* (LBW)

O processo de soldagem a Laser é caracterizado pela fusão localizada da junta através de seu bombardeamento por feixe de luz concentrada, de alta intensidade, capaz de fundir e até mesmo vaporizar parcialmente o material da junta no ponto de incidência, causando um furo (“keyhole”), que penetra profundamente no metal de base. Esta é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada na fabricação de peças complexas, na união de diversos materiais, em juntas formadas por partes de espessuras e materiais similares ou dissimilares, em alta velocidade. Como a energia é fornecida de forma bastante concentrada, os volumes de material afetados pelo calor da soldagem são reduzidos, bom como a energia total necessária para produzir a solda. (MARQUES *et al.*, 2011, p. 309)

Como vantagens para o processo de soldagem a laser, pode-se destacar os seguintes pontos (ASM, 1993, p. 756):

- A luz é inercial, o que permite que altas velocidades de soldagem sejam permitidas;
- A luz de laser focalizada fornece alta densidade de energia;
- Materiais difíceis para soldar como, por exemplo, Titânio e Quartzo podem ser soldados por esse processo;
- Não é necessária utilização de material de adição para a junta soldada;
- Soldas com pouca ou sem contaminação podem ser produzidas;
- A zona termicamente afetada (ZTA) é muito estreita.

Uma característica fundamental da cavidade do laser é o cuidado na sua construção, pois é necessário que o sistema seja livre de contaminações e que suas lentes sejam precisas para a aplicação desejada, com objetivo de aumentar a sua eficiência. (MARQUES *et al.*, 2011, p.310)

O laser mais comumente utilizado é o laser de CO<sub>2</sub>. Com esse tipo de laser, é possível realizar a alteração da densidade de energia na superfície do material, variando-se a potência e o foco do feixe. Lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência são utilizados para corte e soldagem. Neste tipo de equipamento é necessário a entrada contínua do gás no sistema, que usa uma alimentação de tensão contínua em algumas dezenas de kV. Os equipamentos de laser do tipo Nd:YAG produzem um feixe contínuo, mas apresentam menor consumo de energia e são empregados em aplicações em que se exige menores temperaturas. (MARQUES, *et al.*, 2011, p. 310)

Neste processo, as principais variáveis da soldagem são a energia do feixe, a distância focal, a velocidade de soldagem, a refletividade das peças e a duração do pulso (no caso de Laser pulsado). Geralmente, a soldagem é autógena, ou seja, não é necessário a adição de material, contudo esta pode ser usada na união de peças de grande espessura para compensar algum afundamento da poça de fusão. As operações com fontes de alta intensidade pode ser feitas utilizando-se duas técnicas: a da fusão convencional, como em outros processos de soldagem, e a técnica “keyhole” ou do furo. Esta técnica é a mais utilizada e somente é possível se a densidade de energia for suficientemente alta para fundir rapidamente toda a espessura da junta. Para isso, é necessário que o feixe esteja perpendicular à superfície das peças e que seja bem absorvido. As temperaturas no interior do furo podem atingir valores extremamente altas, tornando a técnica “keyhole” bastante eficiente, pois o calor é conduzido em forma radial para fora, formando uma região fundida que cerca o vapor. Quando o feixe se

move ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço atrás do furo e se solidifica, formando a solda. Esta técnica permite altas velocidades de soldagem e é necessário um controle muito preciso das variáveis operacionais para êxito da operação. (MARQUES *et al.*, 2011)

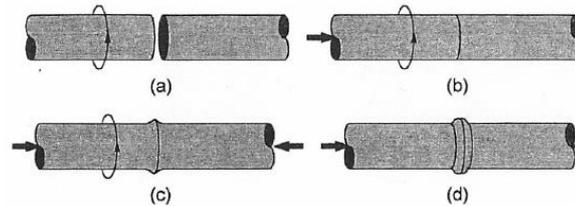
Como aplicações, pode-se destacar a utilização na indústria metalmeccânica para operações de corte, soldagem e gravação de peças metálicas, particularmente em aplicações onde são necessários grande precisão dimensional em peças de baixa espessura. Na indústria automotiva, tem-se utilizado o laser de CO<sub>2</sub> com auxílio de robôs para soldagem, o que permite posicionamento e movimentação muito precisos sobre a peça de trabalho, com alta relação custo-benefício, apesar do custo elevado dos equipamentos. (MARQUES *et al.*, 2011)

### **4.2.3 Processos de soldagem por deformação**

#### **4.2.3.1 Soldagem por fricção convencional (FRW)**

É um processo de união no estado sólido, ou seja, que acontece abaixo da temperatura de fusão, no qual a coalescência entre as partes metálicas é obtida por aquecimento através de atrito entre as peças com aplicação de pressão. No processo, uma das peças a ser soldada é rotacionada com velocidade constante e a outra permanece estacionária. Após contato inicial entre as peças, o calor é produzido por atrito devido às forças aplicadas no sentido axial, aquecendo as superfícies. Além disso, a força axial e o calor gerado provocam a deformação plástica das peças, ao passo que o processo continua sendo executado. Ao final, aplica-se uma força final, gerando-se uma rebarba e a consolidação da união. O processo também pode ser subdividido em duas variações: por arraste contínuo e por inércia. A figura 2 representa esquematicamente as 4 etapas do processo de soldagem por fricção (MARQUES *et al.*, 2011, p.311; PINHEIRO e BRACARENSE, 2021).

Figura 2 - Representação do processo FRW: (a) rotação rápida de uma das peças, (b) aplicação de pressão, (c) deformação plástica e (d) recalque final



Fonte: Modenesi (2011)

Na figura 2.a, é apresentado a disposição inicial das peças a serem soldadas, onde a peça a esquerda apresenta velocidade constante e a peça a direita encontra-se na condição estacionária. Na figura 2.b, acontece o contato inicial entre as peças, através de forças aplicadas no sentido axial, onde este contato gera calor aquecendo as superfícies em função do atrito. Na figura 2.c, acontece deformação plástica devido ao aumento da força axial e do aquecimento. Na figura 2.d, acontece o caldeamento e forjamento da junta soldada proveniente do escoamento dos materiais durante a soldagem (FARIA e BRACARENSE, 2003; TAVARES e BRACARENSE, 2017).

Na soldagem por arraste contínuo, as peças são fixadas nas garras do equipamento e uma delas é acelerada até atingir a velocidade adequada, por intermédio de uma unidade motora. A peça que se encontra estacionária é deslocada por uma força axial até tocar a peça que está em movimento. Este contato provoca o aquecimento das superfícies por atrito e, quando as superfícies em contato atingem a temperatura de forjamento dos materiais, a unidade motora é desacoplada da peça que está em rotação, esta é parada e a força axial é aumentada, para se obter o forjamento. Esta força é mantida até que as peças esfriem e estejam soldadas (ASM, 1993 e MARQUES *et al.*, 2011).

No processo de soldagem por inércia, o processo é semelhante. Contudo, a garra que segura a peça giratória está ligada a um volante, que é acelerado através da unidade motora até atingir a velocidade de soldagem. Quando esta velocidade é atingida, a unidade motora é desacoplada e só então a peça estacionária é deslocada em direção à peça que está girando (ASM, 1993 e MARQUES *et al.*, 2011).

Os parâmetros de soldagem utilizados e que são levados em consideração no processo de soldagem por fricção são (FARIA e BRACARENSE, 2003):

- Velocidade de rotação (rpm);
- Pressão de aquecimento (MPa);
- Pressão de soldagem (MPa);
- Tempo de aquecimento (s);
- Tempo de frenagem (s);
- Tempo de espera (s);
- Tempo de forjamento (s);

A união de materiais através do processo FRW apresenta vantagens como a diminuição das tensões residuais, distorções, não formação de trincas, estreita zona termicamente afetada (ZTA), obtenção de juntas de alta qualidade e excelentes resultados mecânicos devido ao seu baixo aporte térmico, principalmente para materiais dissimilares (BOZZI *et al.*, 2010; GIPIELA, 2007; MACHADO, 1996).

A maior parte dos metais pode ser soldado por atrito, com exceção para os seguintes materiais (FARIA e BRACARENSE, 2003):

- Ferro fundido, pois o grafite tem ação lubrificante;
- Ligas que possuem baixo coeficiente de atrito, como exemplo o bronze e o latão com mais de 0,3 % de Pb;
- Certos aços com inclusão de sulfetos de manganês, pois apresentam a formação de fases frágeis na solda;

Como vantagens do processo FRW, é possível ressaltar que não é necessário atenção especial à limpeza superficial; não é necessário a utilização de metal de adição, fluxo e gás de proteção; este processo não é perigoso para a saúde do operador e é mais seguro, pois não há respingo de metal, radiação ou fumos; defeitos associados a fenômenos de fusão-solidificação não são presentes no FRW, pois o mesmo é um processo em estado sólido; é possível soldar metais dissimilares antes de ser soldados por outros processos (ASM, 1993).

Como desvantagens desse processo é a não uniformidade de espessura da zona termicamente afetada. O motivo é causado pelo aquecimento não uniforme de interface, resultado da alteração na velocidade de rotação, que ocorre do centro da peça em relação à sua extremidade. Além disso, este processo é passível do surgimento de cisalhamento na ZTA e defeitos centrais causados por pequenos orifícios no centro de uma das peças. A variação de dureza ao longo desta região é muito pequena e a resistência à fadiga também não é muito

afetada, principalmente quando o material for temperado e revenido após soldagem (DAWOOD *et al.*, 2017; MARQUES *et al.*, 2011).

No tocante às propriedades mecânicas, no processo de fricção a solda tem características muito próximas à do metal de base, pois não acontece a fusão do metal a ser soldado, nem há utilização de material de adição, atmosfera protetora e escória. A variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada (ZTA) é muito pequena. Além disso, a resistência à fadiga também não é muito afetada, principalmente quando o material for temperado e revenido após a soldagem (FARIA e BRACARENSE, 2003).

No quesito qualidade da solda, os resultados estão intimamente relacionados a correta escolha das variáveis do processo. Por ser um processo de soldagem no estado sólido e por não necessitar de metal de adição ou fluxos, defeitos como poros, inclusões de escória e fases frágeis praticamente não ocorrem. Os defeitos mais comuns são (FARIA e BRACARENSE, 2003):

- Cisalhamento na zona termicamente afetada (ZTA) (provocada por baixa velocidade inicial ou volante superdimensionado);
- Defeitos centrais (provocados por pequenos orifícios no centro de uma das peças).

#### 4.2.3.2 Soldagem por explosão (EXW)

A soldagem por explosão é um processo de soldagem em estado sólido, na qual a união ocorre pelo impacto em alta velocidade das peças em trabalho, como resultado de uma detonação controlada. A explosão acelera o metal numa velocidade que produz uma adesão metálica entre eles após a colisão. É essencialmente um processo à temperatura ambiente em que não ocorre um grande aquecimento das peças em trabalho. As superfícies de contato, entretanto, são aquecidas pela energia de colisão, e a união é conseguida pelo fluxo plástico do metal em suas superfícies. Embora a detonação de explosivos gere considerável calor, não há tempo para transferência de calor para os metais componentes, onde não há aumento de temperatura apreciável entre os metais (ZIEDAS e TATINI, 1997; ASM, 1993).

A soldagem por explosão é um método de união eficaz para virtualmente qualquer combinação de metais. A limitação metalúrgica é a ductilidade e a tenacidade à fratura suficientes para sofrer a deformação rápida do processo sem fratura. A explosão e a soldagem são progressivas, de uma extremidade da junta à outra. As deformações obtidas variam de acordo com o tipo de material e podem ser imperceptíveis em várias soldas sem perda de material. A operação é executada, normalmente, ao ar livre, mas também pode ser feita com atmosfera controlada ou no vácuo (ASM, 1993; MARQUES *et al.*, 2005).

Devido à ausência de aquecimento, as chapas soldadas pelo processo EXW não exibem componentes metalúrgicos em comparação a produtos soldados por fusão, brasagem ou laminados à quente/forjados, onde pode-se destacar a não formação de zonas termicamente afetadas (ZTA), não existem faixas de derretimento contínuo que exibem a química mista e quase não há difusão de elementos de liga entre os componentes (ASM, 1993).

Este processo é adequado para unir metais do mesmo tipo, bem como metais com densidades substancialmente diferentes, pontos de fusão e/ou limites de escoamento. Além disso, o processo é comumente utilizado para unir ligas resistentes à corrosão ao carbono ou ligas de aço. Como limitações, o processo EXW é limitado à colagem de superfícies planas ou superfícies cilíndricas coaxiais, sendo ideal para a colagem de grandes áreas planas, como na fabricação de placas cladeadas. Devido às considerações únicas de segurança e vibração de ruído, EXW é geralmente realizada em instalações relativamente isoladas por empresas especializadas em operações de explosivos. Os principais produtos são grandes placas cladeadas, que são usadas em aplicações de vasos de pressão, trocadores de calor e processos eletroquímicos. Industrialmente, este processo tem sido utilizado para revestimentos, fabricação de chapas bimetálicas e união de metais metalurgicamente incompatíveis. O revestimento de chapas planas constitui a maior aplicação industrial da soldagem de explosão. O processo pode também ser utilizado para revestir as superfícies interna ou externa de cilindros, para fabricação de juntas de tubos com espelhos e trocadores de calor (ASM, 1993; MARQUES *et al.*, 2005).

#### 4.2.3.3 Soldagem a frio (CW)

O processo de soldagem a frio ocorre pelo forte pressionamento de peças lisas e polidas, uma contra a outra, à temperatura ambiente. A união baseia-se na eliminação da interface entre as peças, pela quebra e expulsão das camadas oxidadas e contaminadas das superfícies em contato. A quebra expõe as superfícies internas dos metais a serem soldados, facilitando o contato entre elas e gerando forças interatômicas suficientes e necessárias para formar a solda, formando uma união no estado sólido. O custo do processo pode ser relativamente elevado, pois depende do número de peças a unir e do equipamento necessário. A maioria das aplicações é empregada para a união de materiais não ferrosos (AWS, 1993; MARQUES *et al.*, 2005).

Como aplicações, este processo é utilizado em atividades específicas e o custo de desenvolvimento de um produto é, em geral, bastante alto. Sua principal aplicação é a união a frio de metais não ferrosos, particularmente cobre e alumínio. Como aplicação típica, pode-se destacar a fabricação de congeladores de alumínio (MARQUES *et al.*, 2005).

#### 4.2.3.4 Soldagem por laminação

A soldagem por laminação é um processo realizado no estado sólido onde produz a união de peças metálicas por aquecimento e deformação superficial pela aplicação de pressão através de rolos laminadores. Os metais soldáveis por este processo necessitam apresentar uma ductilidade elevada para serem plasticamente deformados de forma localizada, sem apresentar fratura. Para realização deste processo, são utilizados cilindros de trabalho de mesmo diâmetro. Contudo, cilindros de diferentes diâmetros podem ser utilizados. Para sucesso e bons resultados do processo, é necessário um controle individual da temperatura de cada chapa para se ter um melhor controle da deformação (ASM, 1993; MARQUES *et al.*, 2005).

Como principais aplicações da soldagem por laminação, pode-se destacar o revestimento de chapas de aço carbono e aços de baixa liga com um aço ligado. Outra aplicação típica é a produção de chapas de aço inoxidável colaminado com cobre, utilizadas

na fabricação de painéis domésticos e de equipamentos elétricos como comutadores e cabos (MARQUES *et al.*, 2005).

#### **4.2.4 Soldagem na indústria automotiva**

A soldagem encontra seus primeiros relatos desde tempos bastante remotos, mais especificamente na Idade dos Metais, onde a união entre metais, com destaque para o cobre e bronze era feita através de martelamento, processo similar ao forjamento. Existem registros históricos que no início do século XIX, Sir Humphry Davy conseguiu produzir um arco elétrico controlado entre dois eletrodos de carbono usando uma bateria. Outro registro é que no mesmo século foi desenvolvido o processo de soldagem por resistência elétrica (1856), onde James Joule conseguiu unir arames de cobre (PIRES, 2005).

Durante a Primeira Guerra Mundial houve um grande aumento de demanda produtiva, o que exigiu métodos de fabricação mais rápidos e modernos. Com objetivo de melhorar a segurança e agilidade na união de peças, a soldagem foi pesquisada e reestruturada, permitindo uma ampla utilização destes processos e se colocando como um dos principais setores dentro da indústria (RODAS *et al.*, 2014, p. 91).

Desde o advento da indústria automobilística, em meados do século XIX, a fabricação de automóveis passou por diversos processos evolutivos, que partem desde motores cada dia mais compactos e modernos, aliando duas grandes características, que são potência e consumo, passando por outras partes até chegar em carrocerias mais leves e resistentes, com o objetivo de tornar os automóveis mais seguros, eficientes e competitivos para o mercado consumidor (LOPES; SANTOS, 2020, p.14).

Para que estes resultados sejam atingidos, foi necessário grande evolução na maneira de produzir automóveis. Um grande avanço nesse sentido foi dado a partir do surgimento de novas técnicas/tecnologias de fixação dos mais diversos componentes dos automóveis, seja devido ao aprimoramento dos projetos estruturais dos veículos ou até mesmo pela evolução dos materiais utilizados na fabricação dos mesmos (LOPES; SANTOS, 2020, p.14).

Um dos maiores diferenciais para a indústria automotiva evoluir versou a partir da evolução da automação industrial, pois, com a automação, houve aumento na produtividade,

melhorias significativas na qualidade dos produtos e incremento de confiabilidade no produto final. Esta automação foi disseminada para a soldagem, com a utilização de robôs, que hoje são um grande diferencial na indústria automotiva de forma geral (RODAS *et al.*, 2014).

A década de 1920 trouxe consigo inúmeras evoluções para a soldagem, com início para o desenvolvimento de processos automáticos de soldagem, com destaque para o que pode ser caracterizado como o início do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) por P. O. Nobel, da empresa General Electric. Neste processo utilizava arames sem revestimento e operava em corrente contínua, utilizando também a intensidade da tensão do arco elétrico como base para regular a velocidade de alimentação do arame. Inicialmente, este processo foi usado para reparar eixos de motor e carcaças para eixos traseiros (LOPES; SANTOS, 2020, p.14).

Outros processos de soldagem apresentam grande contribuição para a evolução da indústria automotiva, colaborando com o advento da fabricação dos veículos, adicionando robustez, qualidade e desempenho a indústria automotiva. Dois processos têm grande influência no segmento automotivo: a soldagem a ponto e a soldagem por ultrassom, que é o objeto de estudo deste trabalho.

#### 4.2.4.1 Soldagem por ultrassom (USW)

A soldagem ultrassônica (USW) é um processo de estado sólido que produz uma solda através da introdução de vibração de cisalhamento de alta frequência e pressão normal para a interface da solda. A pressão é aplicada perpendicularmente às superfícies e a vibração ultrassônica induz forças de cisalhamento de alta frequência e, quando estas forças ultrapassam o limite de escoamento do material, deformações locais acontecem. Além disso, as forças de cisalhamento de alta frequência quebram e removem os contaminantes superficiais, espalham óxidos intersticiais e contaminantes, aumenta a área de contato das peças a serem soldadas e produzem uma sólida ligação metalúrgica superficial dos metais. A vibração induzida é paralela à superfície das peças e a união se dá por aquecimento e deformação plástica das superfícies em contato. A solda é produzida sem a fusão do metal de base e sua principal vantagem em relação aos processos convencionais de união por soldagem é o baixo aporte térmico na solda (DeVries, 2004; CHANG e FRISCH, 1973; AWS, 1993 e MARQUES *et al.*, 2005, p. 330).

A primeira demonstração do processo de soldagem por ultrassom remota do início da década de 1950, onde o processo se limitava ao refinamento de grãos. Nos dias atuais, a técnica pode ser aplicada a vários materiais, desde materiais mais maleáveis até materiais mais duros (GRAFF, 2005 e BLOSS e GRAFF, 2009).

Neste processo, duas peças de trabalho, que são fixadas entre a ponta de soldagem (sonotrodo) e a bigorna são friccionadas uma contra a outra ou uma ao longo da outra. A fricção proporciona uma limpeza e refino das camadas superficiais de óxido nas peças, com remoção parcial dos contaminantes e camadas de óxido e contribui para a formação de pequenos pontos de solda que se transformam em solda (DANIELS, 1965; SHAYAKHMETOVA *et al.*, 2021).

A ligação entre as peças a serem soldadas acontece em intervalos de tempo de décimos de segundo a vários segundos a uma temperatura bem abaixo do ponto de fusão dos materiais soldados (SHAYAKHMETOVA *et al.*, 2021).

No tocante à temperatura da junta soldada, várias literaturas mediram esta grandeza na interface da solda durante o processo *USW*. Na maioria dos casos, as temperaturas medidas foram de 30 a 80% do ponto de fusão dos metais (ELANGO VAN, 2010). Além disso, Jeng e Horng (2001) atestaram que a temperatura de contato entre os materiais a serem unidos desempenha um papel importante na resistência mecânica da junta na fase inicial do processo.

O resultado deste processo, ou seja, a solda é produzida por forças de cisalhamento oscilantes na interface entre os dois metais, sendo unidos enquanto são mantidos juntos sob força de fixação estática moderada. As tensões internas resultam em deformação elastoplástica na interface. O deslizamento interfacial altamente localizado na interface tende a quebrar óxidos e filmes de superfície, permitindo contato em muitos pontos. Conforme a oscilação contínua quebra os pontos e a área de contato cresce, ocorre a difusão através da interface para produzir uma estrutura semelhante à de uma solda por difusão. Além disso, este processo produz um aumento de temperatura localizado a partir dos efeitos combinados de histerese elástica, deslizamento interfacial e deformação plástica. O processo de soldagem é concluído sem ter metal totalmente fundido na interface quando a combinação correta de parâmetros de força, potência e tempo são usados (ASM, 1993).

A soldagem ultrassônica de metais é bem diferente se comparado a soldagem dos plásticos. Nos metais, a vibração ultrassônica acontece de maneira paralela à superfície, enquanto nos plásticos a vibração ocorre de maneira perpendicular à superfície de materiais a serem unidas (ELANGOVAM *et al.*, 2010). Essa diferença é dada pela construção do equipamento, pois para a soldagem de metais, é necessário a retirada da camada de oxidação

do material através da vibração do sonotrodo. Com isso, o sonotrodo é paralelo a superfície. Nos plásticos, por não haver processo bem definido de oxidação e formação de óxido, o sonotrodo é perpendicular a superfície para proporcionar energia suficiente para a união dos materiais por atrito.

Outro grupo de material que tem recebido atenção crescente devido a ser uma técnica de muito potencial de aplicação é para a união de compósitos termoplásticos reforçados com fibra de carbono (CFRTP), pois o processo *USW* apresenta com vantagens alta eficiência na união, processo limpo, confiável e inofensivo ao meio ambiente e ao ser humano (KUMAR *et al.*, 2017 & GREWELL e BENATAR, 2007).

Além disso, o processo *USW* utiliza de baixa amplitude e alta frequência (superior a 15 kHz), o que provoca atrito superficial e aquecimento viscoelástico, unindo assim materiais sólidos que são mantidos juntos sob pressão.

Como aplicações industriais, o processo de soldagem ultrassônica tem destaque na união de metais não ferrosos diferentes sem a utilização de consumíveis, com tempo de soldagem relativamente baixo, baixo consumo de energia e quase nenhuma dissipação de calor. Além disso, este processo ainda tem grande aplicação na união de plásticos e na fabricação de embalagens herméticas. Outro destaque da aplicação deste processo no segmento industrial está relacionado a fabricação de juntas de transição cobre-alumínio nas bobinas do motor de arranque de automóveis e outras uniões de fios elétricos automotivos (com diferentes espessuras de bitolas). Além disso, outros produtos são obtidos por meio deste processo, como chicotes elétricos para indústria automotiva e de eletrodomésticos, fusíveis, disjuntores, equipamentos para ventilação e ar-condicionado (HVAC), entre outros (AWS, 1993 e MARQUES *et al.*, 2005).

Os metais mais adequados para este processo são os metais não ferrosos, como cobre, alumínio e suas ligas. Materiais que contém chumbo, zinco e estanho não são recomendados para serem soldados, pois apresentam elementos que atuam como lubrificante, minimizando a abrasão exigida para execução da soldagem (MARQUES *et al.*, 2005, p.330).

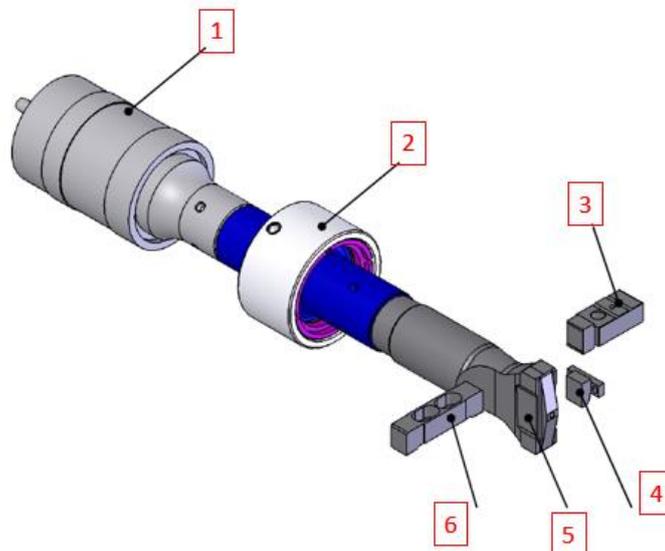
Como parte integrante do equipamento para execução da soldagem ultrassônica, temos os seguintes itens:

1. **Conversor:** responsável por converter a energia elétrica em energia mecânica (vibracional);
2. **Booster:** responsável por amplificar a vibração produzida pelo conversor;
3. **Bigorna:** responsável por exercer a pressão necessária durante o processo de soldagem.

4. **Plaqueta:** limitador da região de soldagem do sonotrodo;
5. **Sonotrodo:** responsável por transmitir a energia vibracional até o material a ser soldado;
6. **Garra deslizante:** exercer a compactação transversal dos materiais, aproximando-os da plaqueta;

Na figura 3 está representado um equipamento básico de soldagem ultrassônica, com destaque para o sonotrodo (1) e a bigorna (2).

Figura 3 - Equipamento de soldagem ultrassônica



Fonte: Schunk (2022)

As variáveis básicas do processo de soldagem ultrassônica são três: amplitude de vibração, pressão aplicada e o tempo de soldagem. Deve-se fornecer energia suficiente para romper as camadas de óxidos e promover deformação superficial, criando condições para a formação de ligações atômicas. A potência é uma função da amplitude da vibração, da força aplicada e a energia fornecida ao processo é proporcional ao tempo de soldagem (MARQUES *et al.*, 2005, p. 330).

O material utilizado no processo *USW* tem influência no resultado, pois a sua dureza é fator importante. Quanto mais duro o metal, maior a potência mínima para fazer uma solda com qualidade aceitável. Quando se solda metais de durezas diferentes, é necessário a potência mínima para o processo, que é calculada em função da mínima potência para soldar

o metal mais duro. Além disso, o ajuste da pressão é muitas vezes mais crítico (DANIELS, 1965).

#### *4.2.4.1.1 Mecanismo da soldagem por ultrassom (USW)*

O processo de soldagem por ultrassom (USW) consiste em processos inter-relacionados e complexos, como deformação plástica, endurecimento por trabalho, quebra de filmes contaminantes, fadiga, formação e propagação de trincas, fratura, geração de calor por atrito e deformação plástica, recristalização e Inter difusão (CHANG e FRISCH, 1973).

Outros experimentos utilizando analisador de micro-scan e analisador de micro varredura em ligas de cobre mostraram que nenhum efeito de difusão pode ser observado em processos de ultrassom. Com isso, é improvável que o mecanismo de soldagem ultrassônica seja explicado através de um processo de fusão. Contudo, alguns autores defendem que este processo é outra forma de soldagem por fusão ativa, a partir do calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica, ou pelo menos é um processo de soldagem fortemente assistido pelo calor (DANIELS, 1965 e CHANG e FRISCH, 1973).

No início do processo, há um movimento alternativo de atrito de deslizamento das superfícies de contato das peças de trabalho. Nesta fase inicial, as camadas superficiais de contaminantes e óxidos são pulverizados e parcialmente removidos. Com esse atrito, a temperatura aumenta. O aumento de temperatura na solda é ocasionado através da combinação entre histerese elástica, deslizamento interfacial localizado e deformação plástica. As temperaturas medidas feitas com materiais cobrindo uma ampla gama de temperaturas de fusão mostram que o máximo de temperatura de interface quando boas soldas são produzidas atingem valores entre 35 e 50% da temperatura absoluta de fusão dos materiais, mostrando que não ocorre derretimento na zona de solda (DANIELS, 1965 e CHANG e FRISCH, 1973).

Estas observações fortemente suportam o mecanismo de ligação de estado sólido. Adesão, um dos mecanismos de ligação do estado sólido, requer um contato íntimo da interface. A presença de filmes contaminantes superficiais é prejudicial na obtenção do contato atômico próximo entre as superfícies metálicas. Com isso, os óxidos superficiais precisam ser removidos ou quebrados, de maneira a permitir que os metais limpos estejam em contato. No processo, a limpeza desses filmes contaminantes é realizada a partir

da combinação entre tensões de cisalhamento alternadas ao redor da solda, que resulta de carga de força normal e tangencial oscilante. (CHANG e FRISCH, 1973)

Se a tensão de atrito for menor do que a tensão de fluxo, o deslizamento bruto acontece. Com isso, definindo  $\mu$  como o coeficiente de atrito quando uma força tangencial oscilante é aplicada à solda, a deformação plástica começa quando a seguinte condição for satisfeita:

$$\mu N = k A \tau_y \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$\mu$  - Coeficiente do atrito do material

N - Força normal aplicada na solda

K – Constante

A – Área da solda

$\tau_y$  – Tensão de cisalhamento

Essa deformação plástica causa separação adicional do filme contaminante e deslocamento de partículas nas proximidades da interface dos metais no processo de soldagem (CHANG e FRISCH, 1973).

Com isso, o mecanismo dominante para soldagem ultrassônica (*USW*) é a ligação do estado sólido, e é realizado por dois processos diferentes: deslizamento e deformação plástica, onde a formação da solda é vinculada principalmente a este último processo (CHANG e FRISCH, 1973).

O estudo de Ye *et al.* (2022) indica que a interface dos materiais soldados pelo processo ultrassônico sofre deformação plástica sob a combinação da ação de tensão normal e da tensão de cisalhamento. A natureza ultrassônica das vibrações, conhecidas por produzir o efeito de suavização acústica, são benéficas de alguma forma para o desenvolvimento da subestrutura e deformação plástica porque a energia ultrassônica tende a ser absorvida em regiões de altos defeitos interatômicos, como contorno de grãos e discordância.

Durante o processo USW, a alta taxa de deformação levará a um aumento acentuado na concentração de vazios interatômicos. Alta concentração desses vazios provoca formação de micro asperezas, que aumentam a difusividade. Este excesso de vacâncias induzida por grandes concentrações de tensões afetam, principalmente, o estágio inicial de nucleação da formação da solda, onde a micro solda foi formada por difusão atômica. A formação de micro solda é acompanhada pela deformação e fratura durante o processo de soldagem. A aspereza que vem de uma micro solda quebrada pode formar uma nova micro solda quando entra em contato próximo com os átomos as superfícies de ligação sob temperatura suficientemente alta e longo tempo de soldagem (LONG *et. al.*, 2020).

Estudos de Ao *et. al.* (2022) evidenciam que a oxidação superficial se intensifica no processo *USW* com o aumento da energia de soldagem proporcionado pelo desgaste mútuo entre os ferramentais e as peças. Além disso, a microestrutura da interface de solda apresenta interstícios atômicos com baixos valores de energia de soldagem, enquanto ligações mais íntimas foram estabelecidas com maiores valores de energia de soldagem.

Outra característica evidenciada nos estudos de Ao *et. al.* (2022) é que com altos valores de energia de soldagem a resistência a força de cisalhamento diminui. Isso se deve ao fato de altas energias de soldagem inserirem descontinuidades nas juntas soldadas.

A formação de juntas e mecanismo de ligação de solda ultrassônica para fios de cobre de núcleo único de vários fios envolve a deformação das micro asperezas, a formação da micro solda e, em seguida, o fluxo plástico da micro solda. Por fim, a solda sem defeito de vazios será formada com o aumento contínuo da área de micro solda. Além disso, a recristalização dinâmica e a recuperação dinâmica promovem a formação de interface de ligação e ligação metalúrgica entre fios de cobre (LONG *et. al.*, 2020).

#### 4.3 ENSAIO VISUAL

O ensaio visual é um dos primeiros métodos de ensaios não-destrutivos que antecedeu a qualquer outro tipo de ensaio. Este método é utilizado para inspeções superficiais externas, para determinar se a junta atende aos requisitos de qualidade exigidos. Este ensaio é também uma importante ferramenta para o controle da qualidade, para o controle dos processos de soldagem em duas etapas, anterior a soldagem e após a soldagem. A inspeção antes do processo de soldagem tem por finalidade verificar a geometria da junta e características que

impossibilitem o processo. Após a soldagem, a inspeção visual tem por objetivo detectar possíveis discontinuidades introduzidas na soldagem, seja dimensional ou estrutural, limitando-se as que se apresentam superficialmente (FBTS, 2009).

O ensaio visual consiste na inspeção visual e exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição do produto que está sendo inspecionado. Além disso, é fundamental que o executante do ensaio seja treinado e especializado nos parâmetros que serão avaliados no processo de ensaio visual. O objetivo fundamental desse ensaio é identificar discontinuidades e defeitos nas regiões soldadas (FBTS, 2009).

Devido a principal fonte da análise ser o olho humano, é possível que erros de análise e medição sejam introduzidos ao processo caso não haja nenhuma forma de padronização. Por isso, fatores como luminosidade, distância ou o ângulo em que as observações são feitas devem ser padronizados. Alguns exemplos para essa padronização são a utilização de instrumentos de medição (escalas, trenas, paquímetros, etc) para identificação dos problemas; como distância focal indicada para a visualização é de 25 cm (FBTS, 2009).

Outros fatores que influenciam na detecção das discontinuidades são (FBTS, 2009):

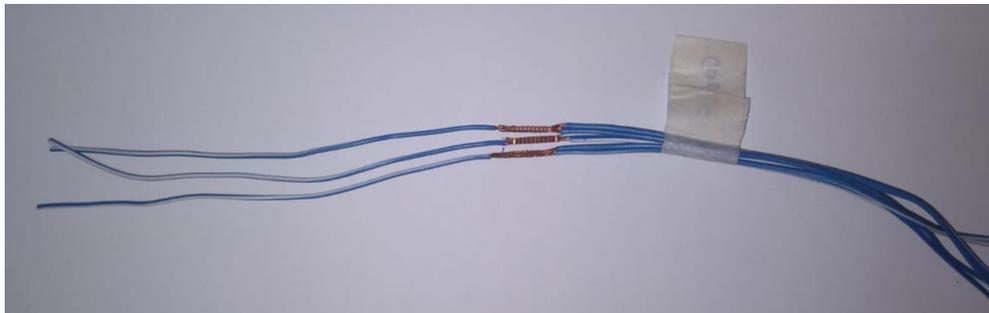
- Limpeza superficial;
- Acabamento das superfícies;
- Nível de iluminação e seus posicionamentos;
- Contraste entre a discontinuidade e o resto da superfície;

Além disso, para auxílio em análise de superfícies pequenas e/ou delgadas, pode-se recorrer a instrumentos para auxiliar a visualização, tais como lupas, microscópios, espelhos e câmeras.

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como finalidade discutir de forma objetiva os materiais e procedimentos utilizados para execução da pesquisa. Neste trabalho foram fabricadas amostras de fios de cobre na combinação 2 para 1, totalizando 42 amostras para serem analisadas em circunstâncias de oxidação variadas. A figura 4 apresenta esquematicamente este material.

Figura 4 – Amostra de fios de cobre na Indústria automotiva



Fonte: O Autor (2022)

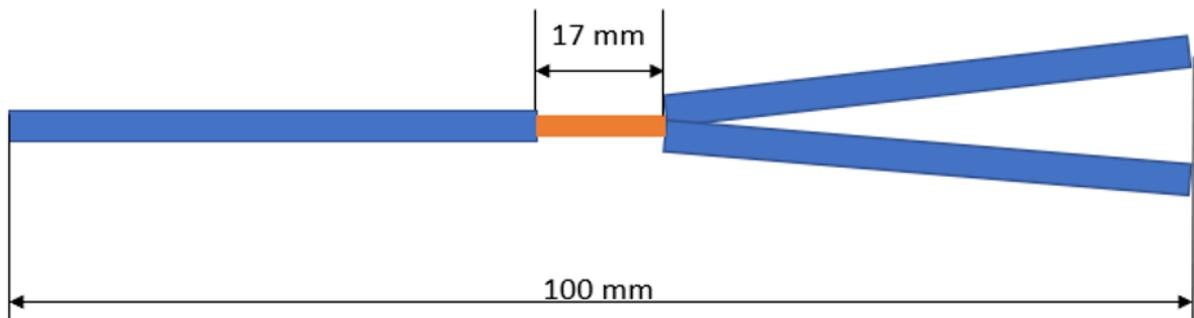
### 5.1 MATERIAIS

Os fios de cobre utilizados nesta pesquisa são fios de cobre eletrolítico (99,99% de pureza) de classificação ASTM B49 aplicados no segmento automotivo, usando a referência 1T20035-000. O fio apresenta um revestimento externo de PVC ACH 9806 N, com classe de proteção II e isolamento térmico de 105 °C. As amostras apresentam como principais características as descritas a seguir:

- **Seção transversal do material:** 0,35 mm<sup>2</sup> para cada perna de fio (total: 1,05 mm<sup>2</sup>)
- **Comprimento da amostra:** 100 mm
- **Comprimento do decape:** 17 mm
- **Configuração da emenda:** 2 para 1 (2 circuitos na entrada para 1 circuito na saída)

A figura 5 representa esquematicamente as características citadas anteriormente.

Figura 5 – Características construtivas das amostras



Fonte: O Autor (2022)

As amostras foram subdivididas em 7 grupos com 6 amostras cada um obedecendo a seguinte divisão:

- **Grupo 01:** amostras sem oxidação
- **Grupo 02:** amostras com 15 dias de oxidação
- **Grupo 03:** amostras com 30 dias de oxidação
- **Grupo 04:** amostras com 60 dias de oxidação
- **Grupo 05:** amostras com 90 dias de oxidação
- **Grupo 06:** amostras com 180 dias de oxidação
- **Grupo 07:** amostras com 360 dias de oxidação

As 6 amostras fabricadas para cada grupo passaram por uma divisão, onde 6 amostras foram submetidas ao ensaio destrutivo de tração e 3 amostras foram destinadas ao processo de microscopia.

## 5.2 MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados todos os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

### 5.2.1 Procedimento de envelhecimento

Para que seja possível uma celeridade nos ensaios, foi realizado um procedimento de envelhecimento das amostras de cobre. Este processo é fundamentado no procedimento interno PF.90303, que determina uma série de ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras para a obtenção da oxidação por um determinado período. As amostras com

envelhecimento de 15 dias não passaram por estas etapas de ciclo térmico, pois se tornaria inviável estrategicamente a realização desse processo em função dos ínfimos tempos nos ciclos, optando-se assim por um envelhecimento natural das amostras. Por motivos de confidencialidade, não foi autorizado fotografar os equipamentos utilizados no processo.

O procedimento de envelhecimento consiste em realizar ciclos de aquecimento e resfriamento conforme descrito nas etapas abaixo:

- I) **Pré-ensaio:** as amostras foram levadas para 2 ciclos de ensaio na câmara climática, com temperaturas variando entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante um intervalo de tempo que variou de 80 min para as amostras de 1 ano até 6,6 min para as amostras de 1 mês de envelhecimento.
- II) **Ciclo 01 – Estufa – Freezer – Estufa:** nesta etapa, as amostras passam por 5 ciclos de aquecimento-resfriamento-aquecimento. O aquecimento acontece a uma temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Imediatamente após a saída da estufa, os materiais são levados ao freezer, onde são expostas a temperaturas de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Esta etapa repete-se 5 vezes de forma ininterrupta para cada grupo de amostra.
- III) **Ciclo 02 – Câmara úmida – Freezer – Estufa:** nesta etapa, as amostras passam por 5 ciclos de aquecimento-resfriamento-reposo-aquecimento-reposo. Na etapa de câmara úmida, o material é submetido a um ciclo de aquecimento a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras. Após isso, as amostras são levadas ao freezer a temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) durante tempo calculado para cada tipo de envelhecimento das amostras.

Os parâmetros utilizados para envelhecer os materiais estão apresentados nos anexos.

### 5.2.2 Procedimento de soldagem ultrassônica

Após a preparação das amostras no processo de envelhecimento, elas foram encaminhadas ao processo de soldagem ultrassônica para fios de cobre. O equipamento utilizado foi uma máquina de solda do fabricante Schunk modelo Minic II. Os parâmetros de engenharia, que são os parâmetros estabelecidos para garantir que os materiais sem grau de oxidação sejam soldados, são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de engenharia para soldagem dos fios de cobre 0,35 mm<sup>2</sup> (total: 1,05 mm<sup>2</sup>)

Energia de soldagem (Ws)	Pressão (BAR)	Amplitude (%)	Largura (mm)	Tempo (ms)
124	2,34	55	1,12	291

Fonte: O Autor (2022)

Estes parâmetros de engenharia foram obtidos através de técnica DOE, onde todos os parâmetros são de regulagem na máquina de solda, ou seja, eles são inseridos no equipamento para que o processo possa acontecer.

Outro fator é que estes parâmetros garantem os requisitos de união estabelecidos no procedimento interno PF.90303/2018, que são a união completa dos 7 filamentos de cobre e força de cisalhamento superior à 10 N.

A figura 6 apresenta uma ilustração sobre a máquina de solda utilizada no processo.

Figura 6 – Máquina de solda utilizada no experimento



Fonte: StripTek (2021)

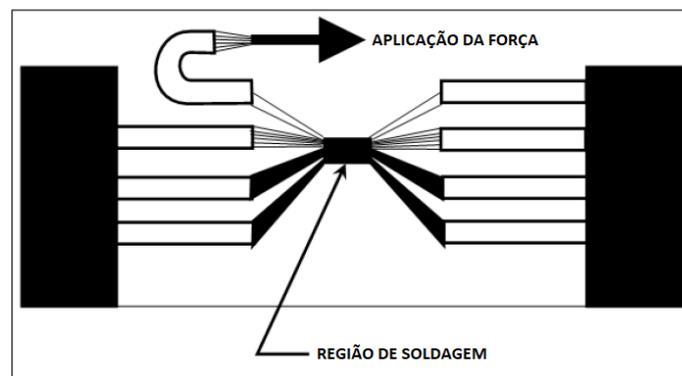
### 5.2.3 Ensaio de tração

Após a soldagem das 6 amostras de cada grupo, 3 destas amostras foram submetidas ao processo de ensaio de força de tração tipo *peeling*. Este ensaio é mais crítico se comparada ao teste de força de tração convencional. O tipo *peeling* tem por objetivo verificar a resistência a tração da amostra com uma força aplicada a um ângulo de 180° (condição mais extrema do uso em campo), enquanto o processo de tração convencional aplica a força na

direção radial (ângulo  $0^\circ$ ). A figura 7 apresenta esquematicamente o processo de ensaio de tração tipo *peeling*.

Baseado no procedimento interno PF 90.303/2018, que regulamenta este processo, para o diâmetro de cabo de  $0,35 \text{ mm}^2$  o valor mínimo admissível para força de tração método *peeling* para aprovação da amostra é de 10 N.

Figura 7 – Representação esquemática ensaio de tração *peeling*



Fonte: O Autor (2022)

O procedimento que regulamenta este processo, que por motivos de confidencialidade não poderá ser referenciado aqui, afirma que para o diâmetro de cabo de  $0,35 \text{ mm}^2$  o valor mínimo admissível para força de tração método *peeling* para aprovação da amostra é de 10 N.

O equipamento utilizado para este processo é o dinamômetro da marca Starrett, modelo FFM 550-X, com data de calibração de 03/05/2021. A figura 8 ilustra esquematicamente o equipamento utilizado no processo, em que as principais características do dinamômetro serão apresentadas na tabela 4.

Figura 8 – Dinamômetro Starrett FFM 550-X



Fonte: Starrett (2021)

Tabela 4 – Características construtivas e operacionais Dinamômetro Starrett FFM 550-X

<b>CAPACIDADE (N)</b>	2500
<b>CURSO DE TESTE (mm)</b>	762
<b>TEMPERATURA DE OPERAÇÃO</b>	+5 °C a +43 °C
<b>PRECISÃO DE MEDIÇÃO (%)</b>	99,98

Fonte: Starrett (2021)

#### 5.2.4 Ensaio visual

Após a soldagem das 6 amostras de cada grupo, foram selecionadas de forma aleatória 3 amostras para inspeção visual com auxílio de microscópio antes de serem submetidas ao ensaio de tração tipo *peeling*. Este ensaio foi realizado por técnico de laboratório especializado em microscopia ótica, e habilitado ao procedimento interno. Esta etapa tem por objetivo verificar a integridade da solda, verificando aderência e conformidade da união realizada no processo de soldagem e os critérios de aceitação são: união completa dos 7 filamentos de cobre e impressão das ranhuras do ferramental da ultrassônica sobre o cobre. Estes critérios de aceitação estão presentes no procedimento interno PF.90303/2018.

As amostras foram inseridas no campo de visão do microscópio ML 3700, fabricante MECAL para visualização da face anterior e posterior da união soldada, com objetivo de verificar a marca executada pelo ferramental de soldagem e se houve a aderência dos filamentos de cobre.

Esse processo foi realizado em um microscópio de bancada cujas informações técnicas estão apresentadas na tabela 05.

Tabela 5 - Informações técnicas Microscópio ML 3700

<b>TIPO</b>	<b>ML 3700/EFP</b>
<b>LIGAÇÃO ELÉTRICA</b>	100-240 VAC - 50/60 Hz
<b>Ampliação mínima (monitor 15")</b>	24x
<b>Ampliação máxima (monitor 15")</b>	288x
<b>Resolução de medição por pixel</b>	13 - 7,31-5,17-3,72-3,00-2,45- 2,10- 1,84- 1,64-1,47- 1,34- 1,23- 1,14- 1,06-
<b>Etapas de zoom óptico</b>	0,58 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,5 - 5,0 - 5,5 - 6,0 - 6,5 - 7,0
<b>Resolução da câmera</b>	1280 x 1024 pixel

Fonte: Mecal (2022)

A figura 9 ilustra esquematicamente o equipamento utilizado no processo.

Figura 9 - Visão esquemática microscópio de bancada



Fonte: Mecal (2022)

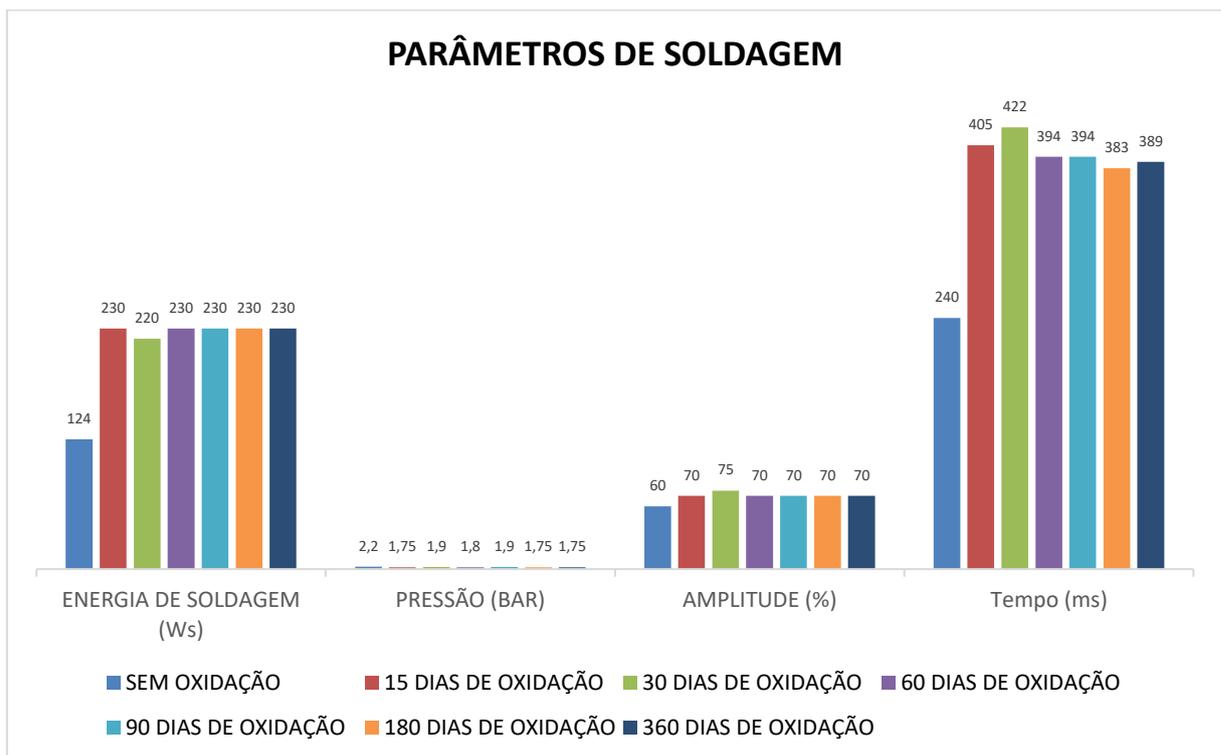
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo.

### 6.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM ULTRASSÔNICA

No tocante aos resultados da soldagem das emendas será discutido a seguir. No gráfico 01 serão apresentados os resultados de soldagem para os 7 grupos de amostras submetidos ao processo de soldagem ultrassônica. Vale ressaltar que esses foram os parâmetros que garantiram a soldabilidade dos materiais. Valores abaixo destas referências não permitiram os mínimos requisitos de união dos materiais.

Gráfico 1– Parâmetros de soldagem após procedimento experimental



Fonte: O Autor (2022)

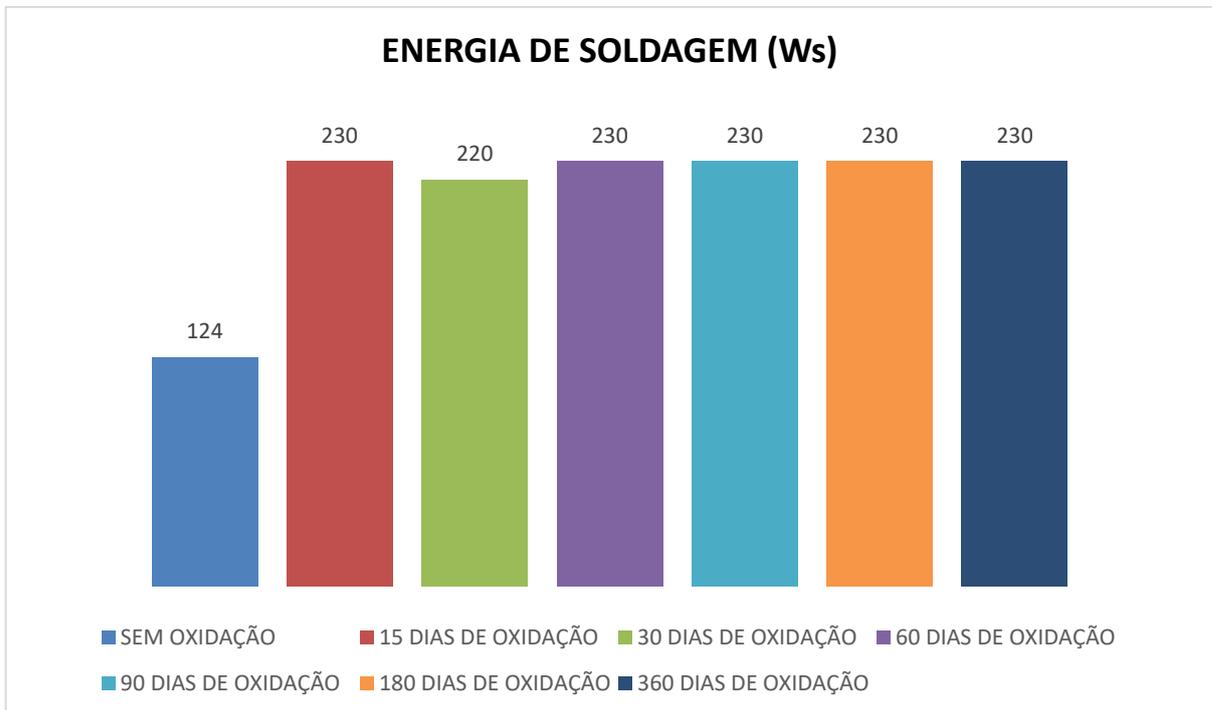
A partir destes resultados, serão discutidos a seguir a influência de cada um destes parâmetros na qualidade de cada amostra de solda reproduzida.

### 6.1.1 Energia de soldagem

Na soldagem ultrassônica, a energia de soldagem fornecida pelo equipamento é diretamente proporcional à pressão  $P$ , amplitude  $A$  e tempo  $t$ . Com base nestes argumentos, diferentes níveis de pressão, amplitude e tempo foram adotados para realizar os experimentos (SHAHID *et. al.*, 2019).

Para o estudo realizado, foram encontrados parâmetros de energia de soldagem que garantiram as mínimas características visuais da solda e não permitiram o desprendimento de nenhum filamento do fio de cobre, pois, por norma PF.90303, em função do diâmetro do fio ( $0,35 \text{ mm}^2$ ) e a quantidade de pernas (7 pernas), a aprovação visual de uma emenda se dá a partir do não desprendimento de nenhuma perna dos fios. O gráfico 02 apresenta os valores de energia de soldagem obtidos no experimento.

Gráfico 2 – Parâmetro energia de soldagem após procedimento experimental



Fonte: O Autor (2022)

O material sem oxidação cumpriu o requisito necessário e apresentou boa soldabilidade com o parâmetro de engenharia (124 Ws). A partir dos 15 dias de envelhecimento/oxidação, o valor de energia necessário foi de 230 Ws, com exceção do

material com 30 dias de soldagem, que apresentou o valor de 220 Ws, que apresentou essa redução em função do tempo de soldagem. Esse aumento de energia é justificado pela necessidade do processo de quebrar a camada de óxido formada na superfície dos fios de cobre e, para que essa condição seja atendida, é necessário intensificar a energia e o tempo de soldagem para sucesso na remoção da contaminação superficial (CHANG e FRISCH, 1973).

Quando é variado a energia de soldagem durante o processo, há uma variação na amplitude vibratória e, portanto, a tensão dinâmica na superfície de solda. Caso haja variações abruptas da energia da soldagem para valores superiores ou inferiores ao limite tolerável, há consequências negativas na junta soldada, uma vez que para valores muito elevados, grandes tensões dinâmicas danificarão a solda, pois introduzem trincas e proporcionam o cisalhamento da solda; em caso de valores muito baixos, nenhuma solda é realizada. Em materiais mais espessos e/ou mais duros, os valores requeridos de energia de soldagem são mais elevados se comparados a materiais mais delgados e/ou mais moles (DANIELS, 1965; CHANG e FRISCH, 1973).

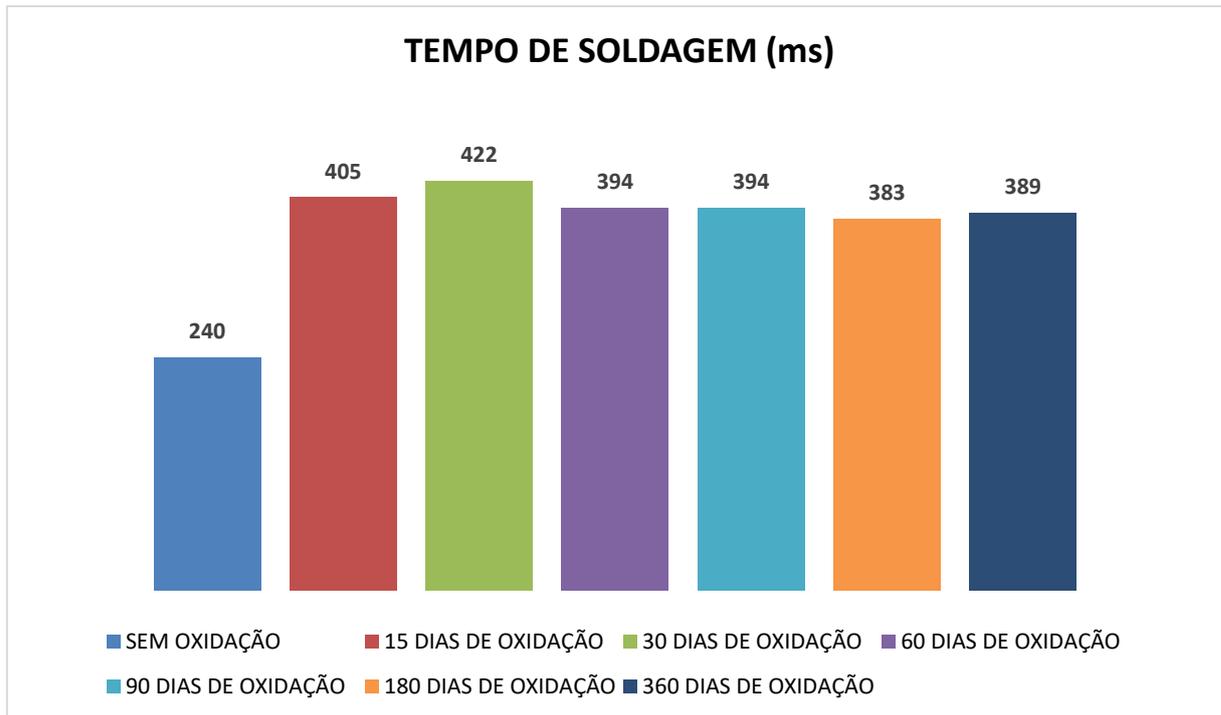
Para o aumento da energia de soldagem, a variável de maior interferência e importância é a frequência de vibração da ponta do sonotrodo em relação a tensão elétrica de entrada. O deslocamento ideal da ponta do sonotrodo são aqueles que permitem executar uma solda com boa resistência mecânica quando mantida as outras variáveis constantes (CHANG e FRISCH, 1973).

Como a energia de soldagem é produto da potência, outra variável muito importante para construção do processo é o tempo de soldagem, que será discutido na seção a seguir.

### **6.1.2 Tempo de soldagem**

O tempo de soldagem é uma variável que se encontra intimamente ligada a energia de soldagem e tem influência direta com a capacidade e a qualidade da junta soldada produzida. O gráfico 03 apresenta os resultados do tempo de soldagem obtido no experimento.

Gráfico 3 – Parâmetro tempo de soldagem após procedimento experimental



Fonte: O Autor (2022)

O efeito do tempo de soldagem é importante para o parâmetro pressão de soldagem, pois tempos prolongados de soldagem resultam em danos por fadiga e tempos de soldagem insuficientes resultam em soldas incompletas (TYLECOTE, 1968). O tempo mínimo necessário varia com a espessura das peças em contato com o sonotrodo. Em cenários práticos, para materiais de espessuras delgadas, tem-se o tempo de soldagem de, aproximadamente, 0,005 s e para materiais mais espessos esses valores podem se aproximar da casa de 1,2 s (ASM, 1993).

Matheny e Graff (2005) discutem a influência do tempo de soldagem e qual a correlação desse parâmetro com os outros parâmetros de soldagem. De acordo com ambos, o tempo de soldagem pode ser uma variável dependente ou independente de outros parâmetros. Essa correlação ou não acontecerá com base no tipo de sistema de soldagem que está sendo utilizado.

Na soldagem com fios de cobre sem oxidação, o tempo obtido foi o parâmetro de engenharia (240 ms). Com o aumento da oxidação, o tempo de soldagem também aumentou proporcionalmente até o período de 30 dias de oxidação. Nos materiais a seguir, o tempo de soldagem caiu e se estabilizou. Essa estabilidade também foi percebida com a energia de soldagem. Além disso, o tempo de soldagem variou praticamente da mesma forma que a

energia de soldagem, o que permite inferir que energia e tempo são grandezas intimamente interligadas.

Os tempos encontrados no experimento foram validados pelos estudos de Matheny e Graff (2005). Nos resultados encontrados, a soldagem de materiais metálicos é bastante curta, abaixo de 1 s (1.000 ms), onde os tempos mais comuns variam entre 0,25 e 0,5 s (250 a 500 ms). Tempos de soldagem superiores a esses valores requerem a necessidade de examinar a solda a fim de verificar a propagação de trincas e defeitos; além disso, tempos maiores do que esses inferem que há a necessidade de modificar os parâmetros de soldagem no sistema.

Outro estudo de Matheny (2012) feito em folhas de cobre encontrou os melhores resultados de soldabilidade para tempos de soldagem que variaram entre 300 e 500 ms. Para tempos superiores (700 a 900 ms) os resultados de soldagem encontrados não foram satisfatórios e as soldas foram reprovadas. Além disso, através de uma análise de Pareto e diagrama de efeito, foi confirmado que os parâmetros que mais influenciaram no resultado de resistência média da solda foram a pressão de soldagem e o tempo de soldagem, utilizando uma combinação de pressão a partir de 3 bar e tempos entre 300 e 500 ms.

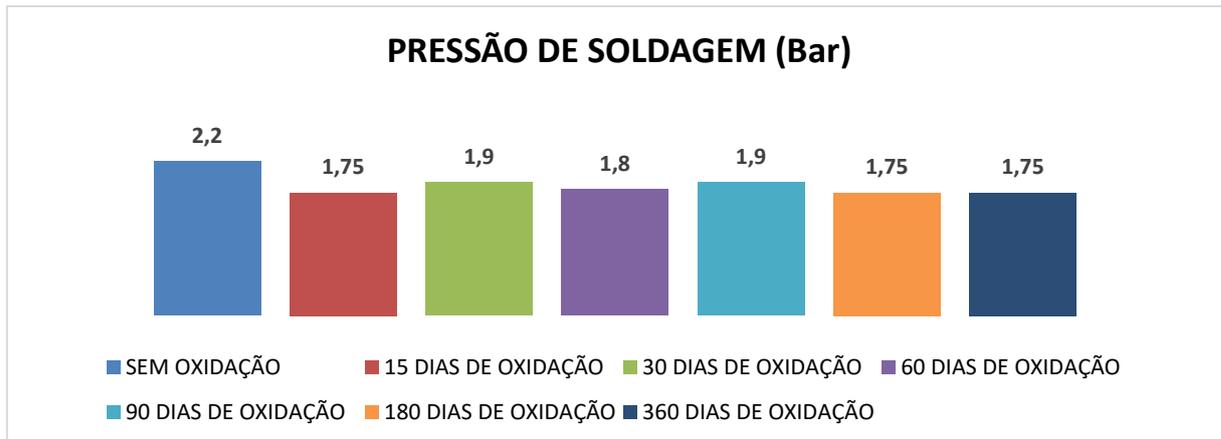
Elangovan (2010) no estudo realizado em juntas de cobre com 0,2 mm de espessura obteve tempos para o melhor resultado de resistência mecânica da junta soldada com tempos de soldagem de 225 ms, o que é um tempo muito próximo ao tempo determinado pela engenharia de 240 ms.

Além disso, Elangovan (2010) comprova em seus estudos a forte interação entre tempo e pressão de soldagem na obtenção de juntas soldadas com alta ou baixa resistência mecânica. Além disso, é comprovado também uma correlação entre tempo e amplitude de soldagem para o resultado de elevação ou redução de resistência mecânica das juntas de cobre soldadas.

### **6.1.3 Pressão de soldagem**

A pressão de soldagem tem papel importante na constituição da solda no processo ultrassônico. Este parâmetro é essencial ao processo de soldagem devido ao fato que a soldagem ultrassônica só ocorre após um contato acústico entre as peças de trabalho e o sonotrodo (AMZA *et al.*, 2010). O gráfico 04 apresenta os resultados de pressão de soldagem obtidos no experimento.

Gráfico 4 – Parâmetro pressão de soldagem após procedimento experimental



Fonte: O Autor (2022)

De acordo com Amza *et. al.* (2010), percebe-se que ao passo que a pressão de soldagem é reduzida, os valores de resistência à tração da solda diminuem gradualmente. Esse fato acontece com a redução da pressão, o contato acústico fraco entre as peças a serem soldadas e o sonotrodo acontece, promovendo assim um amortecimento da oscilação das ondas ultrassônicas e, por consequência, há uma redução da energia mecânica que é transmitida às peças. Contudo, a pressão não pode ser elevada em demasia, pois com altos valores de pressão, a resistência mecânica da solda aumenta substancialmente. Contudo, há a introdução de características negativas a solda, como marcas indesejadas e rebarbas.

Os resultados obtidos por Amza *et al.* (2010) validam os valores obtidos no ensaio, uma vez que os materiais sem oxidação foram obtidos valores de pressão de 2,2 Bar, conforme determinado pelos parâmetros de engenharia. O resultado obtido foi uma força de cisalhamento média de 33,93 N. Ao passo que os materiais foram sendo envelhecidos, os valores de pressão reduziram significativamente, variando entre 1,9 e 1,75 e quanto mais os valores de pressão são reduzidos, a força de cisalhamento reduz proporcionalmente, o que corrobora com as definições informadas.

O estudo de Siddani *et. al.* (2021) obteve o valor de 2,5 Bar como resultado ideal de pressão para união de chapa de cobre com espessura de 0,2 mm com fios de cobre. Este valor é muito próximo ao obtido no estudo para o grupo de materiais sem oxidação (2,2 Bar), onde combinado com os outros parâmetros, teve melhor resultado na comparação dos 7 (sete) grupos.

O estudo de Hiraishi e Watanabe (2003) indica que valores de pressão excessiva provocam uma elevação demasiada do atrito. Com isso, suprime o movimento relativo das superfícies, resultando na redução da resistência mecânica da solda e aumenta o percentual de adesão da ferramenta/peça, provocando marcações significativas nas peças.

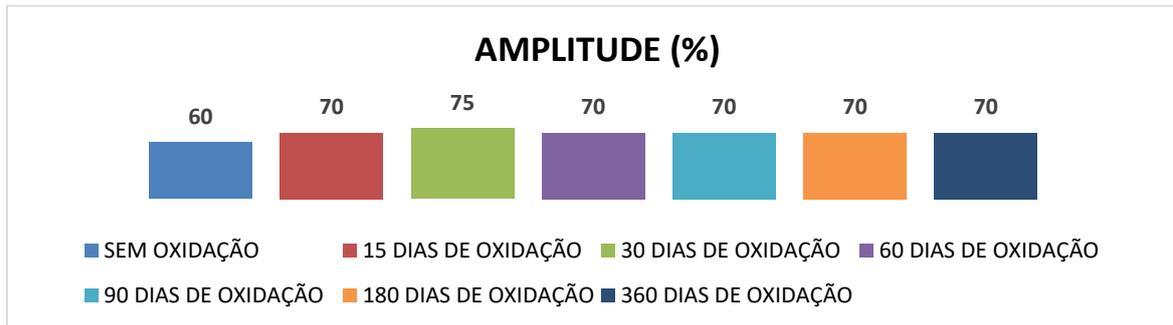
Os resultados obtidos no estudo de Elangovan (2010) em chapas de cobre com espessura de 0,2 mm infere que quando a pressão está no nível de 2 bar, obtém-se os maiores valores de resistência mecânica da junta se comparado a níveis maiores (2,5 e 3 bar). Isso é esperado devido ao fato que, quando a pressão aumenta, o sonotrodo retém as peças de trabalho sem uma quantidade significativa de atrito, ou seja, a elevação da pressão não permite o movimento relativo entre as peças e, conseqüentemente, reduz a temperatura na interface e a soldagem entre as partes.

Além disso, Elangovan (2010), através de uma combinação de parâmetros pelo método ANOVA, inferiu que os parâmetros que resultaram na máxima resistência mecânica da solda foram atingidos com pressão de 2 bar, tempo de 225 ms e amplitude de 50%. A combinação de fatores que obteve o menor valor de resistência mecânica da solda apresenta pressão de 2,5 bar, tempo de 200 ms e amplitude de 45%.

#### **6.1.4 Amplitude**

De acordo com Shadid (2019), a energia de soldagem é um parâmetro diretamente proporcional a Pressão, Amplitude e Tempo. Essa informação está evidenciada e comprovada neste experimento, uma vez que o comportamento da amplitude é diretamente proporcional a evolução da energia de soldagem. O gráfico 05 apresenta o comportamento da amplitude de soldagem durante o experimento.

Gráfico 5 – Parâmetro amplitude após procedimento experimental



Fonte: O Autor (2022)

No experimento, quando a energia de soldagem é alterada, a amplitude de soldagem também é alterada proporcionalmente, pois no equipamento utilizado nos testes, a amplitude de soldagem é variável dependente da energia de soldagem. Com essa variação, há uma variação na tensão dinâmica na superfície da solda. Com isso, amplitudes muito elevadas podem conferir a superfície da solda tensões interfaciais dinâmicas e, caso os valores de amplitude sejam muito baixos, não haverá solda executada (DANIELS, 1965; MATHENY e GRAFF, 2005).

No estudo de Elangovan (2010), o valor de amplitude que oferece a junta soldada os melhores valores de resistência mecânica foram de 50%. Este valor é muito próximo aos valores determinados pelos parâmetros de engenharia, onde a amplitude é de 60%, o que corrobora para justificar que os valores obtidos no estudo são válidos.

Uma outra conclusão obtida em Elangovan (2010) é que os parâmetros de amplitude de soldagem e pressão de soldagem tem forte relação para maximizar e/ou minimizar os valores de resistência mecânica das juntas soldadas. Contudo, os parâmetros de amplitude e tempo de soldagem não tem interação e, por consequência, não são interligados no tocante a potencializar ou reduzir os valores de resistência mecânica das juntas de cobre soldadas.

Os parâmetros de soldagem utilizados no experimento são os parâmetros que garantiram a soldabilidade das amostras. Ou seja, os parâmetros foram adquiridos e não são parâmetros de regulagem no equipamento de soldagem.

A força de resistência ao cisalhamento diminui ao passo que as amostras são envelhecidas devido ao fato que para remoção da contaminação superficial dos fios, é necessário aumento da energia de soldagem e, com isso, são introduzidas tensões e

descontinuidades na solda, o que faz com que a força de resistência ao cisalhamento seja reduzida.

A análise estatística dos 7 (sete) grupos amostrais nos fazem afirmar que o nível de oxidação aumenta até o grupo 3 (amostras com 30 dias de oxidação). Após esse período, os parâmetros se estabilizam, o que mostra que o principal argumento para isso é que o filme contaminante também se estabilizou. A melhor condição de soldabilidade está no grupo 01 (amostras sem oxidação), pois como não existe filme contaminante, a energia de soldagem é mais baixa e, por consequência, não há a introdução de tensões residuais e assim os maiores valores de resistência mecânica são adquiridos.

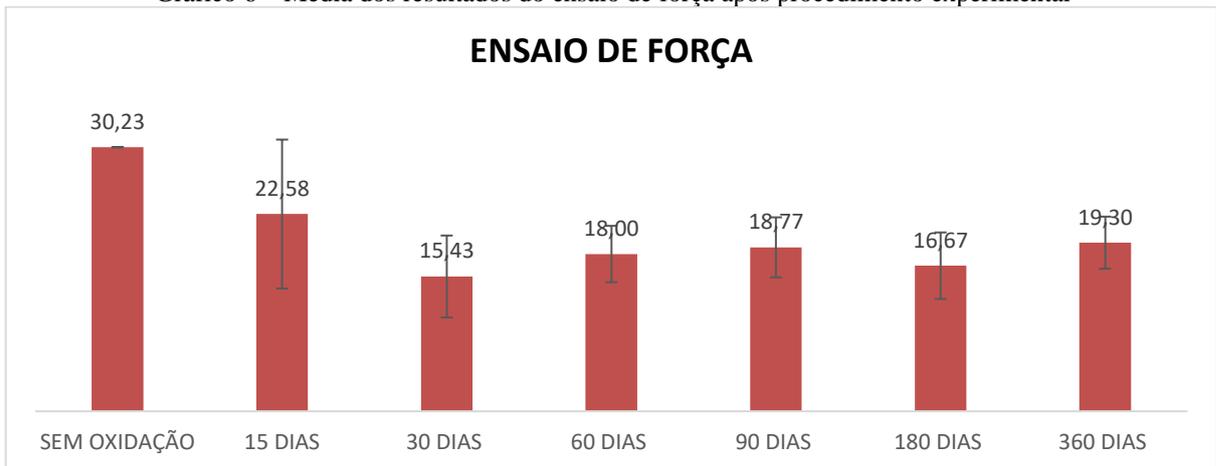
Um fato a ser observado é que com o incremento dos parâmetros, em especial a energia de soldagem, para garantir a soldabilidade dos materiais oxidados, gera desgaste prematuro dos ferramentais do equipamento, podendo também provocar a queima do conversor da máquina, fazendo com que o custo de manutenção seja elevado ao longo do ano.

Um grande resultado encontrado no estudo são os parâmetros que podem ser utilizados para soldar materiais oxidados com até 1 ano sem a necessidade de utilização de álcool isopropílico ou sem a necessidade de descarte dos materiais como refugo industrial (*scrap*).

## 6.2 ENSAIO DE FORÇA TRAÇÃO

No tocante aos resultados de força de tração está discutido a seguir. O gráfico 06 apresenta a média dos resultados para o ensaio e a dispersão (desvio-padrão). Foram utilizadas 6 amostras ensaiadas para cada um dos 7 grupos de submetidos ao processo de soldagem ultrassônica. Vale destacar que, como destacado na seção 5.2.3, o critério de aprovação para a amostra é um valor de força superior a 10 N.

Gráfico 6 – Média dos resultados do ensaio de força após procedimento experimental

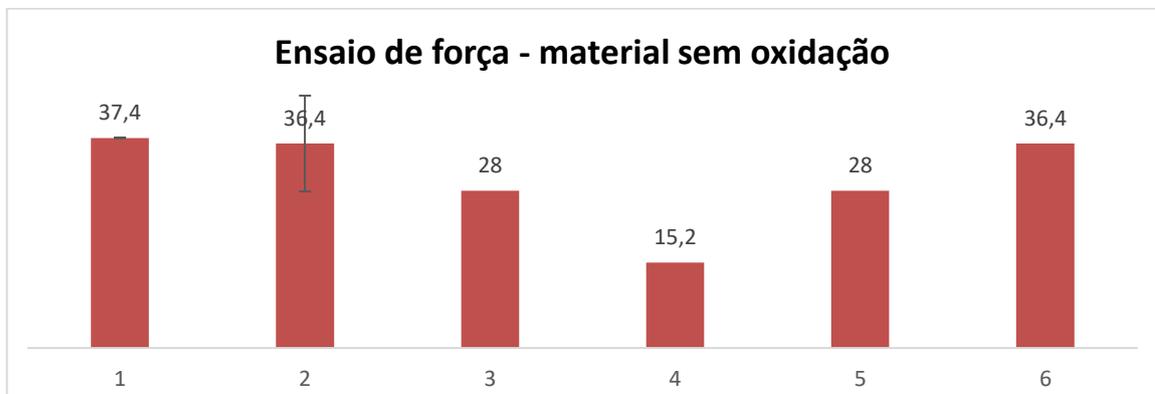


Fonte: O Autor (2022)

### 6.2.1 Grupo 01 – materiais sem oxidação

O gráfico 07 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 01, cujos materiais não apresentam qualquer tipo de oxidação.

Gráfico 7 – Resultados do ensaio de força – materiais sem oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio de força de cisalhamento é de 30,23 N, com desvio-padrão de 8,525. Como esperado, todas as amostras atendem ao requisito normativo de aplicação de força de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Este fato acontece em associação a 2 parâmetros essenciais:

- I) Energia de soldagem: controlada. Neste grupo de amostras, a energia foi de 124 Ws

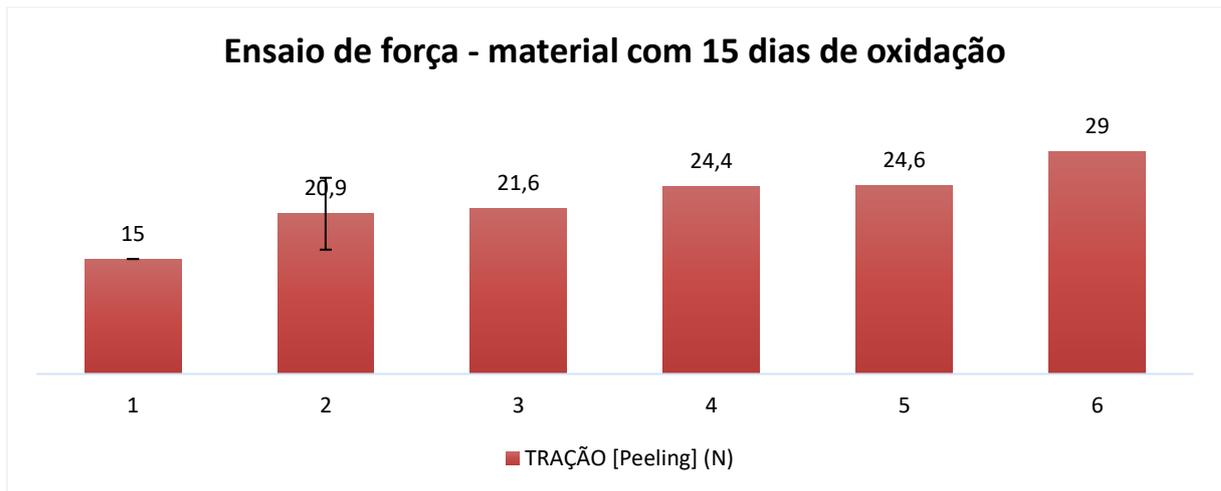
- II) Pressão de soldagem: maior do grupo com valor de 2,2 Bar assim como aconteceu no estudo de Shakil *et al.* (2013).

Com isso, para este cenário os materiais estão validados para utilização normal no produto acabado.

### 6.2.2 Grupo 02 – materiais com 15 dias de oxidação

O gráfico 08 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 02, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 15 dias.

Gráfico 8 – Resultados do ensaio de força – materiais com 15 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio da força de cisalhamento é de 22,58 N, com desvio-padrão de 4,687. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo do tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- I) Energia de soldagem: 230 Ws;  
 II) Pressão de soldagem: 1,75 Bar

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 15 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 25% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada.

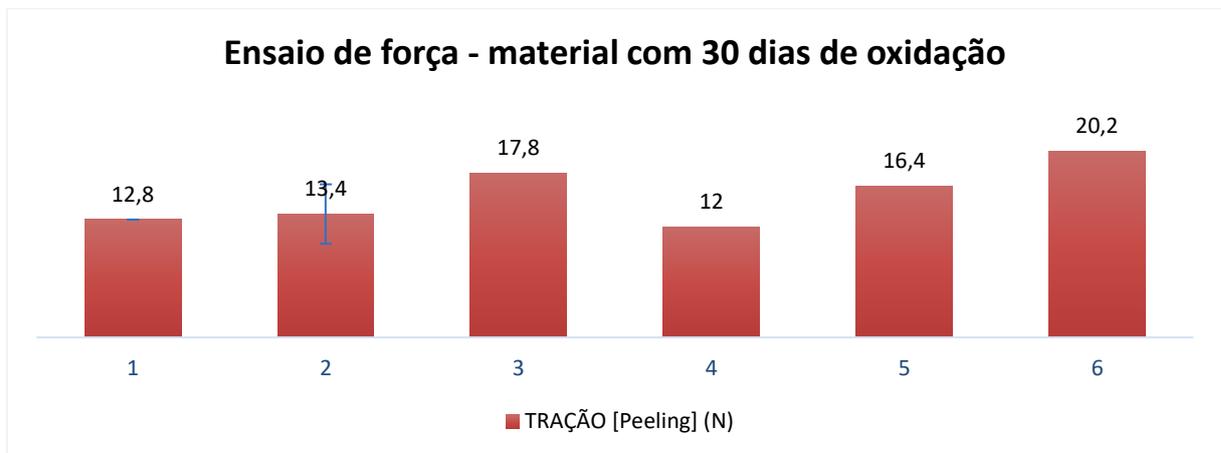
Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Mesmo com grande redução do valor de força de cisalhamento, para este cenário os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos e, por consequência, apresentam características validadas para utilização no produto acabado.

### 6.2.3 Grupo 03 – materiais com 30 dias de oxidação

O gráfico 09 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 03, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 30 dias.

Gráfico 9 – Resultados do ensaio de força – materiais com 30 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio da força de cisalhamento é de 15,43 N, com desvio-padrão de 3,288. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- III) Energia de soldagem: 220 Ws;
- IV) Pressão de soldagem: 1,90 Bar

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 30 dias de oxidação, há um incremento de 56% de energia e uma redução de 49% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da

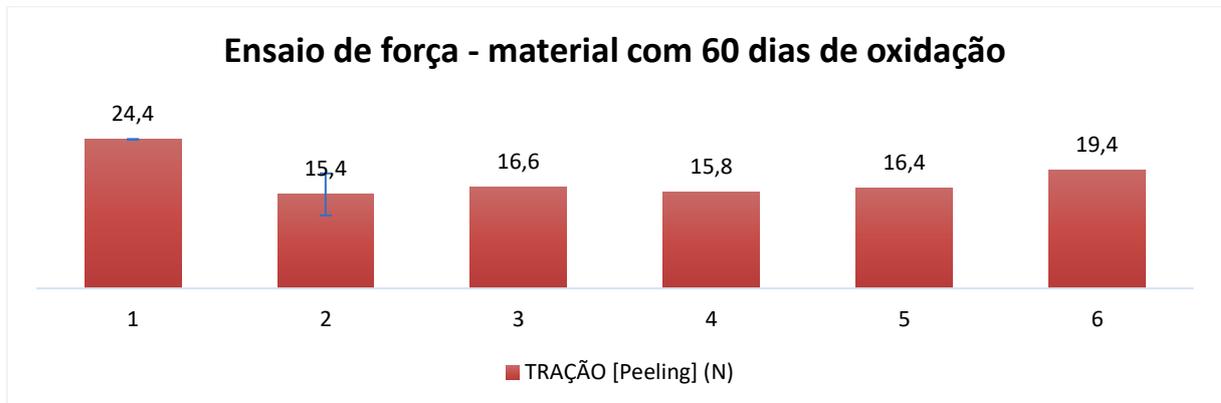
necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada. Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Neste experimento, mesmo com grande redução do valor da força de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração.

#### 6.2.4 Grupo 04 – materiais com 60 dias de oxidação

O gráfico 10 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 04, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 60 dias.

Gráfico 10 – Resultados do ensaio de força – materiais com 60 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio da força de cisalhamento é de 18,00 N, com desvio-padrão de 3,436. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- V) Energia de soldagem: 230 Ws;
- VI) Pressão de soldagem: 1,80 Bar

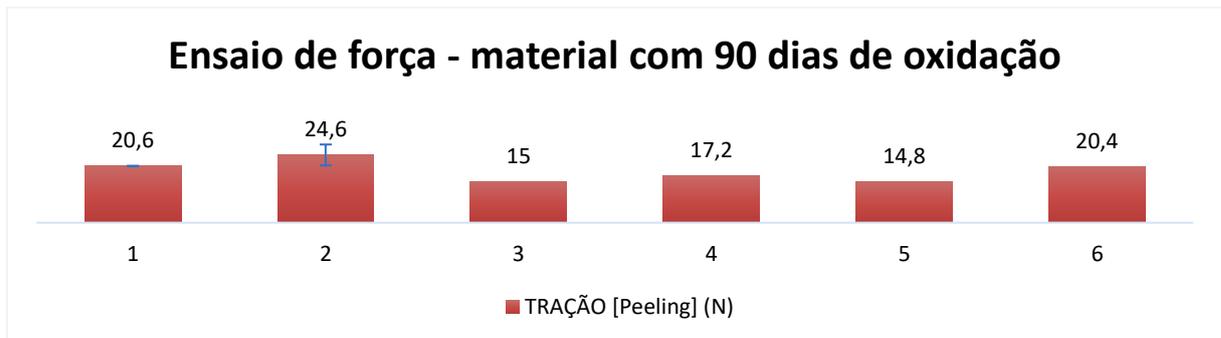
Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 60 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 40% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada. Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Neste experimento, mesmo com grande redução do valor da força de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração.

### 6.2.5 Grupo 05 – materiais com 90 dias de oxidação

O gráfico 11 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 05, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 90 dias.

Gráfico 11 – Resultados do ensaio de força – materiais com 90 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio de força de cisalhamento é de 18,77 N, com desvio-padrão de 3,806. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

VII) Energia de soldagem: 230 Ws;

VIII) Pressão de soldagem: 1,90 Bar

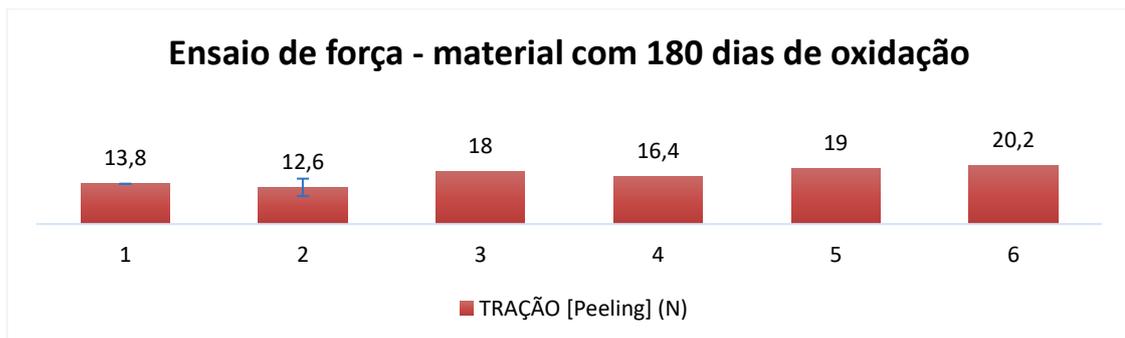
Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 90 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 38% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada. Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Neste experimento, mesmo com grande redução do valor da força de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração. Contudo, o valor mínimo de tração reduzido do desvio-padrão, oferece um valor muito próximo ao limite mínimo permitido de resistência à tração de cisalhamento.

#### 6.2.6 Grupo 06 – materiais com 180 dias de oxidação

O gráfico 12 apresenta os valores de tração e o desvio padrão para as 6 amostras que representam o grupo 06, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 180 dias.

Gráfico 12 – Resultados do ensaio de força – materiais com 180 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio de força de cisalhamento é de 16,67 N, com desvio-padrão de 2,984. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

IX) Energia de soldagem: 230 Ws;

X) Pressão de soldagem: 1,75 Bar

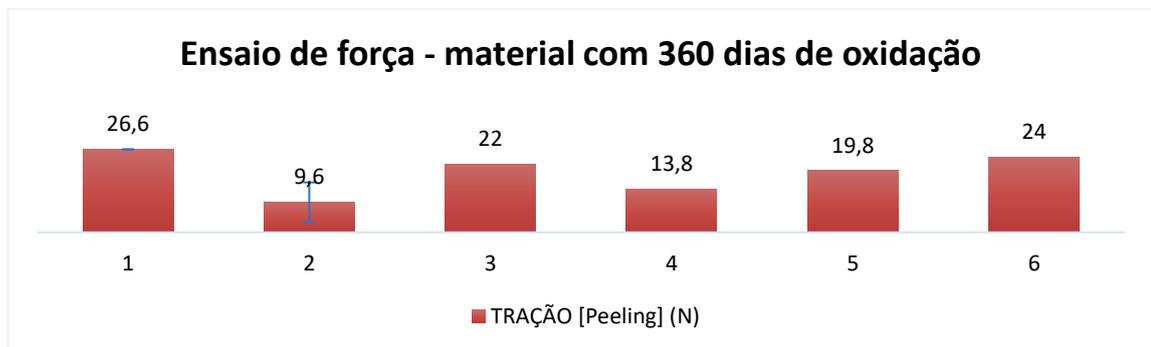
Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 180 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 45% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada. Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Neste experimento, mesmo com grande redução do valor da força de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração. Contudo, o valor mínimo de tração reduzido do desvio-padrão, oferece um valor muito próximo ao limite mínimo permitido de resistência à tração de cisalhamento.

### 6.2.7 Grupo 07 – materiais com 360 dias de oxidação

O gráfico 13 apresenta os valores de força e o desvio padrão para as 3 amostras que representam o grupo 07, cujos materiais passaram pelo processo de oxidação, representando características de envelhecimento por 360 dias.

Gráfico 13 – Resultados do ensaio de força – materiais com 360 dias de oxidação



Fonte: O Autor (2022)

Neste cenário, o valor médio de força de cisalhamento é de 19,30 N, com desvio-padrão de 6,438. Nestas condições, todas as amostras atendem ao requisito normativo de

tração tipo *peeling* superior a 10 N. Os parâmetros de soldagem que permitiram esses resultados foram:

- XI) Energia de soldagem: 230 Ws;
- XII) Pressão de soldagem: 1,75 Bar

Comparando a variação da energia de soldagem entre o material sem oxidação e o material com 360 dias de oxidação, há um incremento de 54% de energia e uma redução de 57% no valor médio de tração. O aumento da energia de soldagem está relacionado ao fato da necessidade da quebra da camada de oxidação dos fios para que a soldagem seja realizada. Contudo, essa quebra de camada de oxidação introduz na solda pequenas trincas e descontinuidades. Com isso, quando a energia de soldagem aumenta no processo, o valor da força de cisalhamento reduz em função das descontinuidades.

Neste experimento, mesmo com grande redução do valor da força de cisalhamento, os parâmetros produzem materiais que atendem aos requisitos de validação de qualidade através do ensaio de tração. Um fato diferente nesse grupo versa a respeito do resultado da tração da amostra 02, que foi de 9,6 N. Este valor é abaixo do mínimo estabelecido, o que reprova a condição da amostra. Contudo, em função dos resultados das outras amostras, estatisticamente esta amostra pode ser considerada com ponto fora da curva e excluída do estudo estatístico.

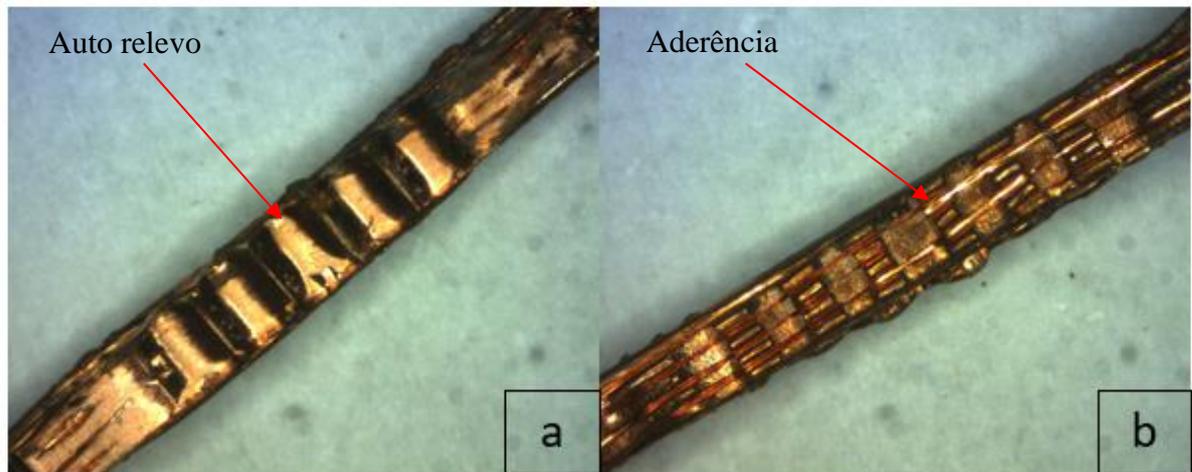
### 6.3 ENSAIO VISUAL

Nesta seção serão discutidas as imagens obtidas através de ensaio de macrografia realizado em microscópio de bancada para os 7 grupos de amostras de soldagem ultrassônica.

#### 6.3.1 Grupo 01 – materiais sem oxidação

Na figura 10 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta específica para as amostras de materiais sem oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 10 – Macrografia grupo 01



Fonte: O Autor (2022)

Como critério de aceitação da solda, é analisado se a geometria das marcas empregadas pelos ferramentais são padrão e existentes na junta soldada e se existe aderência de ambos os lados das faces de soldagem.

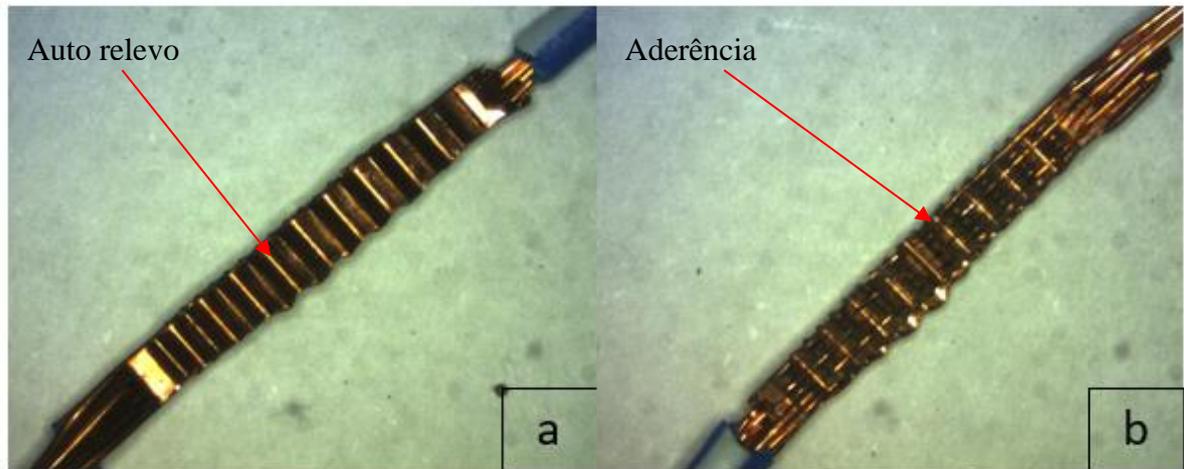
Mediante a isso, na figura 10.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 10.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 01 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

### 6.3.2 Grupo 02 – materiais com 15 dias de oxidação

A figura 11 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 15 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 11 - Macrografia grupo 02



Fonte: O Autor (2022)

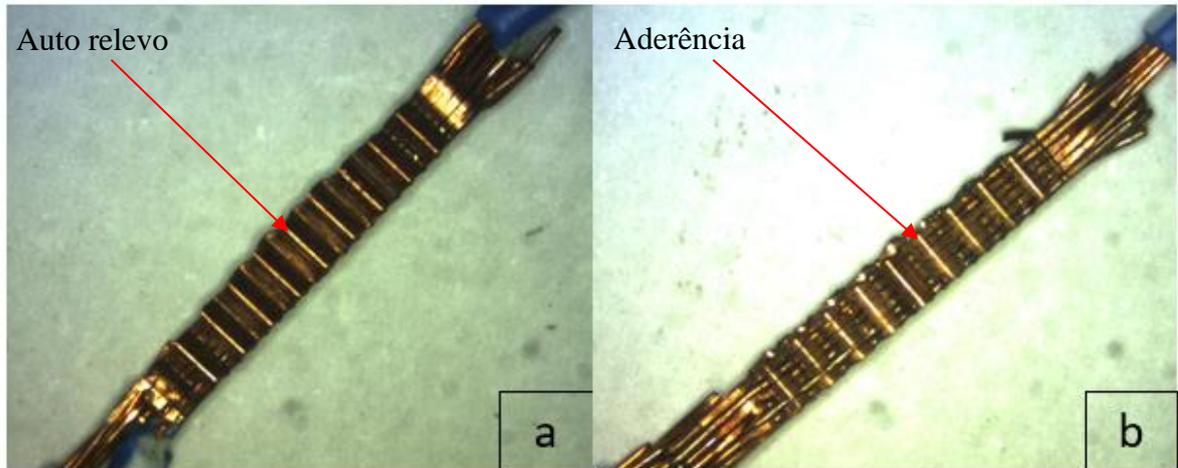
Mediante a isso, na figura 11.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 11.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 02 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

### 6.3.3 Grupo 03 – materiais com 30 dias de oxidação

Na figura 12 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 30 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 12 - Macrografia grupo 03



Fonte: O Autor (2022)

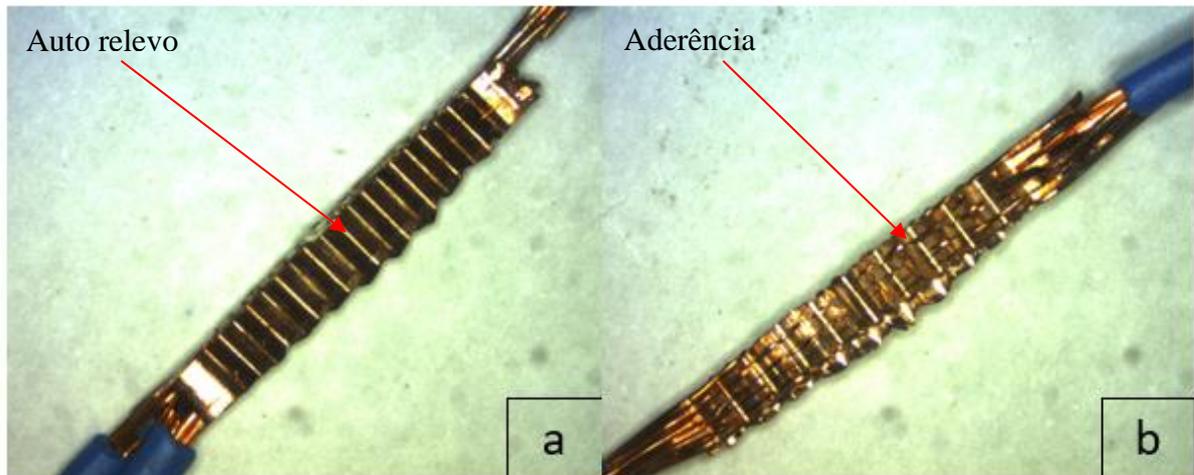
Mediante a isso, na figura 12.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 12.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 03 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

#### 6.3.4 Grupo 04 – materiais com 60 dias de oxidação

Na figura 13 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 60 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 13 - Macrografia grupo 04



Fonte: O Autor (2022)

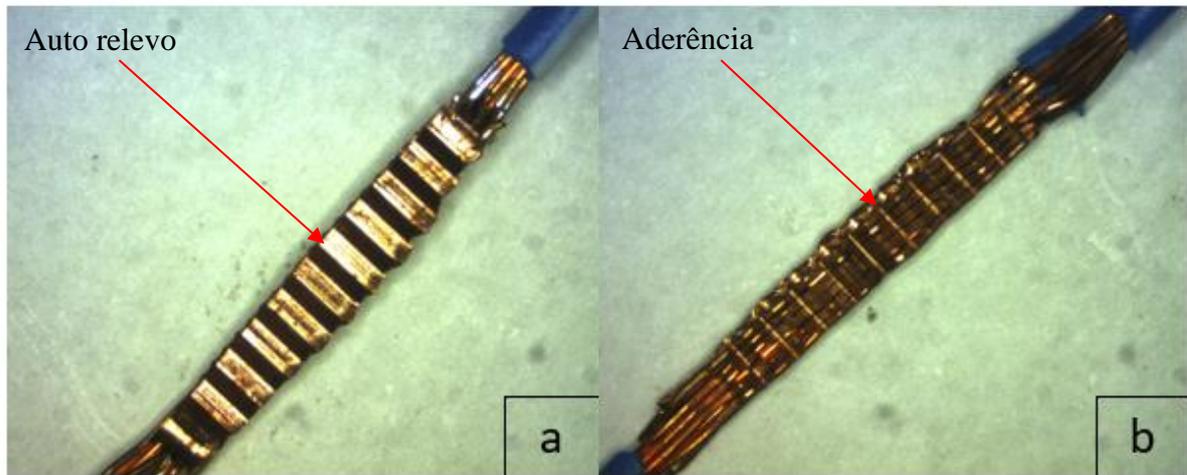
Mediante a isso, na figura 13.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 13.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 04 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

### 6.3.5 Grupo 05 – materiais com 90 dias de oxidação

Na figura 14 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 90 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 14 - Macrografia grupo 05



Fonte: O Autor (2022)

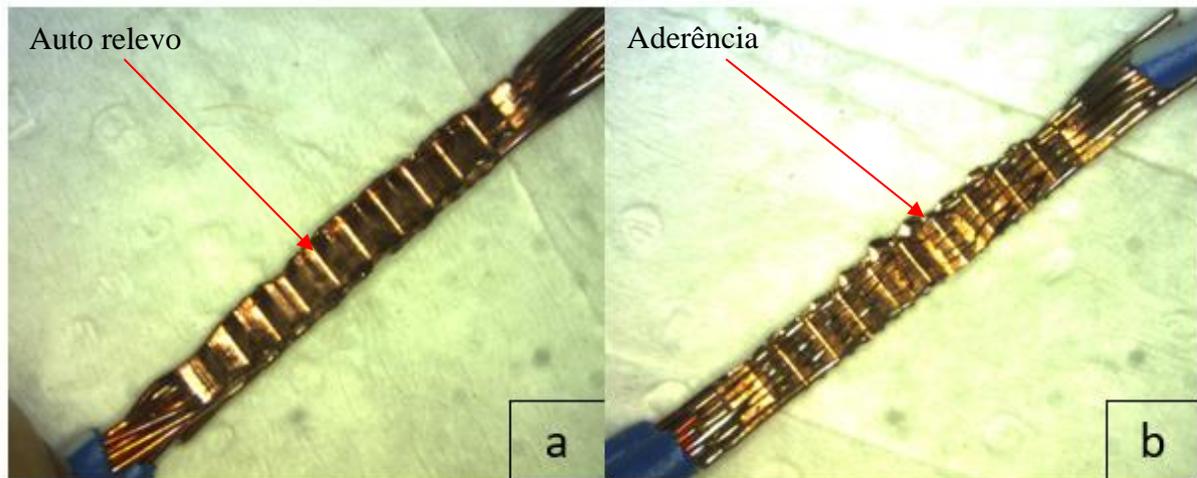
Mediante a isso, na figura 14.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 14.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 05 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

### 6.3.6 Grupo 06 – materiais com 180 dias de oxidação

Na figura 15 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 180 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 15 - Macrografia grupo 06



Fonte: O Autor (2022)

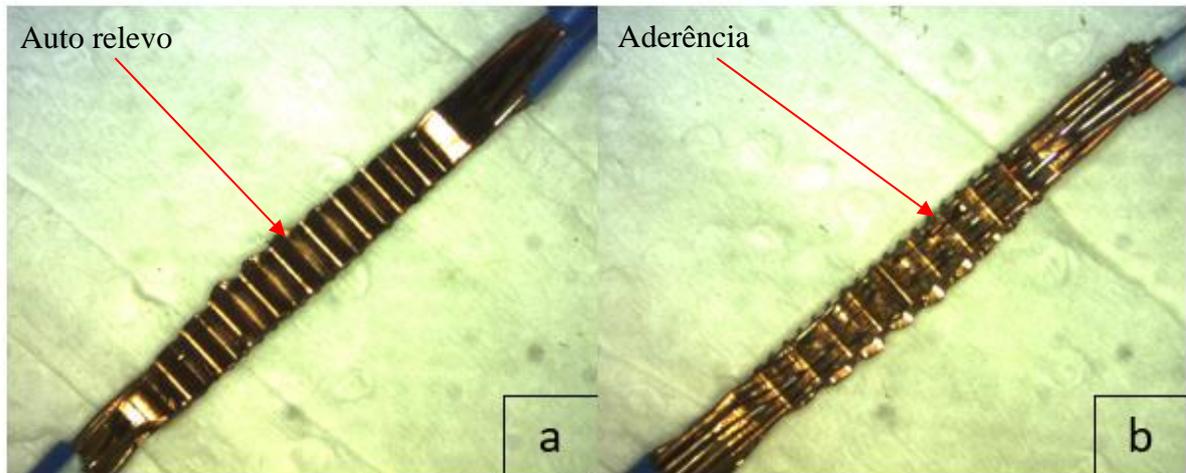
Mediante a isso, na figura 15.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 15.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 06 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

### 6.3.7 Grupo 07 – materiais com 360 dias de oxidação

Na figura 16 são apresentadas as 2 faces após o processo de soldagem e polimento com pasta eletroquímica para as amostras de materiais com 360 dias de oxidação. Na imagem, temos no lado a face superior da solda, onde tem contato direto com o ferramental de soldagem e o lado b apresenta a parte posterior da soldagem.

Figura 16 - Macrografia grupo 07



Fonte: O Autor (2022)

Mediante a isso, na figura 16.a tem-se a marcação em alto relevo dos ferramentais e na figura 16.b é possível verificar a aderência em ambos os lados da solda.

A partir disso, é possível identificar que o processo de soldagem para o grupo 07 atendeu aos padrões de qualidade exigidos.

## 7 CONCLUSÕES

1. Os parâmetros que afetam a soldagem ultrassônica para união Cobre-Cobre foram estudados. Os parâmetros ideais para união dos materiais foram encontrados nos valores de engenharia e confirmados nos materiais sem oxidação.
2. É observado que a pressão de soldagem, tempo de soldagem e amplitude tem efeito significativo na resistência mecânica das juntas soldadas.
3. O parâmetro energia de soldagem tem a maior influência no processo de descontaminação das superfícies oxidadas durante o processo de soldagem ultrassônica, pois é a responsável por inserir energia vibracional no processo.
4. O aumento da energia de soldagem reduz proporcionalmente os valores da força de cisalhamento da solda em função da inserção de deformações na solda.
5. As amostras com 30 dias e 180 dias apresentaram os menores valores de resistência a tensão de cisalhamento.
6. Existe uma linearidade no incremento dos parâmetros nas amostras envelhecidas até 30 dias.
7. Nas amostras a partir de 60 dias, os parâmetros tornam-se estáveis.
8. Uma amostra no ensaio de tração do material envelhecido por 360 dias apresentou valor inferior a 10 N no ensaio de resistência a força de cisalhamento (*peeling*) na região da junta soldada, tornando questionável os parâmetros obtidos para essa condição.
9. O ensaio visual de todos os 7 grupos identifica estágios de oxidação do cobre. Além disso, em todos os estágios a união é íntegra, coesa e atende aos padrões estabelecidos para aprovação visual da solda, uma vez que fica evidente a união dos filamentos em todas as camadas e valores de força de resistência ao cisalhamento superior a 10N.
10. Estatisticamente, o melhor grupo de amostras é o grupo 6 (180 dias de envelhecimento), pois é o que apresenta menor desvio-padrão entre todos os grupos analisados.
11. Com os parâmetros e resultados encontrados, os filamentos de cobre com grau de oxidação até 365 dias apresentam condições de serem trabalhados e utilizados em caráter industrial sem comprometer o produto acabado.

## **8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Influência do aumento da energia de soldagem na microestrutura da junta soldada.
2. Avaliação microestrutural das soldas de cobre para componentes automotivos.
3. Influência da oxidação do cobre na condutividade elétrica em componentes automotivos.
4. Efeito da corrosão do cobre em componentes automotivos.
5. Ensaio de fractografia das juntas soldadas.
6. Desgaste dos ferramentais de máquinas ultrassônicas com o aumento dos parâmetros.

## REFERÊNCIAS

- AMZA, G.; LUCHIAN, C.; NITOI, D. F.; DUMITRACHE, F.; BORDA, C.; GRIGORASC, S. **Contributions Regarding Plastic Materials Ultrasonic Welding used in Automotive Industry**. *Materiale Plastice*, v. 47, nº 1, Itália, 2010.
- AO, S.S.; CHENG, M.P.; ZHANG, W.; OLIVEIRA, J.P.; MANLADAN, S.M.; ZENG, Z.; LUO, Z. **Microstructure and mechanical properties of dissimilar NiTi and 304 stainless steel joints produced by ultrasonic welding**. *Ultrasonics*. 2022. V. 121. Acesso em: 26/12/2022.
- ASM Metals Handbook, **WELDING BRAZING AND SOLDERING**, Volume 06, 1993
- ASTM INTERNATIONAL, **ASTM E340-00**: Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. Pennsylvania, 2000. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/130155/000976164.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01/07/2022.
- BLOSS, M.; GRAFF, K. **Ultrasonic Metal Welding of Advanced Alloys: The Weldability of Stainless Steel, Titanium and Nickel-Based Superalloys**. *Welding Research Proceedings. International Conference, 8º edition*. ASM International. 2008. Acesso em: 31/10/2022.
- BOZZI, S.; HELBERT-ETTER, A.L; BAUDIN, T; CRIQUI, B.; KERBIGUET, J.G. **Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot-welds**. *Materials Science and Engineering A*. 2010; 527(16-17):4505-4509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.097>.
- CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2002. p. 589.
- CHANG, U. I.; FRISCH, J. **On Optimization of Some Parameters in Ultrasonic Metal Welding**. 54<sup>th</sup> AWS Annual Meeting held. Chicago, 1973.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2008. 672 p. ISBN 978-85-212-0449-7.
- DANIELS, H. P. C. **Ultrasonic welding**. *Ultrasonics*, October-December, 1965. P. 190-196
- DAWOOD, A.; BUTT, S.; HUSSAIN, G.; SIDDIQUI, M.; MAQSOOD, A.; ZHANG, F. **Thermal model of rotary friction welding for similar and dissimilar metals**. *Metals*. 2017;7(6):224. <http://dx.doi.org/10.3390/met7060224>
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: Edpuers, 2007. 60 p.
- DEHELEAN, D.; OANCA, O. **Improving productivity and quality in plastic and thin metallic plates manufacturing by using ultrasonic welding processes**. *Soldagem & Inspeção*. São Paulo, Vol. 14, Nº 4, p. 344-351, outubro, 2009.

DEVRIES, E. **Mechanics and Mechanisms of Ultrasonic Metal Welding**, PhD Thesis Ohio State University. 2004. Acesso em: 30/10/2022.

ELANGOVAN, S.; PRAKASAN, K.; JAIGANESH, V. **Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;51(1): 163-171. Acesso em: 31/10/2022.

FARIA, Paulo Eustáquio; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem por Fricção**. Infosolda, 2003. Disponível em: [https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos\\_solda/soldagem-por-frico.pdf](https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/soldagem-por-frico.pdf). Acesso em: 12/10/2022.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. Curso Inspetor de Soldagem 2º ed Rio de Janeiro 2013.

GIPIELA, M.L. **Influência dos parâmetros de processo na geração de defeitos na soldagem FSW da liga de alumínio 5052** [dissertação de mestrado]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2007.

GRAFF, K. **Ultrasonic Metal Welding**. New Developments in Advanced Welding. Cambridge, 241-269. 2009. Acesso em: 31/10/2022.

GREWELL, D.; BENATAR, A. **Welding of plastics: fundamentals and new developments**. Int. Polym Process, 2007; 22(1): 43-60. Acesso em: 26/12/2022.

HIRAIISHI, M.; WATANABE, T. **Improvement of Ultrasonic Weld Strength for Al-Mg Alloy by Adhesion of Alcohol**. Quarterly Journal of the Japan Welding Society. V.21.1. P. 295-301. Japan, 2003. Acesso em: 31/10/2022.

IM, IMPÉRIO DOS METAIS. **Ficha técnica de materiais – cobre eletrolítico**. 2021. Disponível:[https://www.imperiodosmetais.com.br/pdf/download\\_ficha\\_tecnica/cobre/eletrolitico.pdf](https://www.imperiodosmetais.com.br/pdf/download_ficha_tecnica/cobre/eletrolitico.pdf). Acesso em: 03/10/2021.

JENG, YR.; HORNG, JH. **A micro contact approach for ultrasonic wire bonding in microelectronics**. J Tribol 123:725–731. 2001. Acesso em: 30/10/2022.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy** / Sindo Kou.–2nd ed. p. cm. 2002. Wiley-Interscience.

KUMAR, S.; WU, C.S.; PADHY, G.K.; DING, W. **Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review**. J Manuf Process, 2017. V.26 (4): 295-322

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

LOPES, Fábio Eduardo; SANTOS, Felipe Silveira. **Estudo sobre a evolução dos processos de união na indústria automobilista**. Dissertação (Mestrado em engenharia de soldagem) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 87, 2020.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: processo**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MALDONADO, M.C; DÍAZ, V.V. **Evolución de la Microestructura para diferentes configuraciones de la corriente continua pulsada en el proceso de soldadura GTAW**

**autógeno.** Soldagem & Inspeção. 2020; 25: e2535. Disponível: <https://www.scielo.br/j/si/a/dPvXb8fxmnFYtZYdKMQ9bBG/?lang=es>. Acesso em: 15/11/2021. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.35>

MARTIM, H.C; VILARINHO, L. O. **Avaliação da geração de campos magnéticos em soldagens MIG/MAG no modo curto-circuito convencional e controlado.** Soldagem & Inspeção. 2020; V. 25, e2507. Disponível: <https://www.scielo.br/j/si/a/Bmv7MbY4dGL8zDShtmQ6Z5Q/?lang=pt>. Acesso em: 15/11/2021. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.07>

MARQUES, P.V.; MODENESE, P.; BRACARENSE, A. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** Minas Gerais: Editora UFMG, 3ª edição, 2011.

MATHENY, M. P.; GRAFF, K. F. **Ultrasonic welding of metals.** New Developments in Advanced Welding, chapter 9, ed. N. Ahmed, Woodhead Publishing Limited, 2005, ISBN: 978-1-85573-970-3.

Matheny MP. **Ultrasonic metal welding foils to tabs for lithium-ion Battery cells EWI Summ Rep SR1301.** Columbus (OH): EWI. 2012. Acesso em: 30/10/2022.

PANTANO FILHO, R.; PANTANO, P. M. **Microscopia óptica: determinação de tamanhos de grãos.** Intellectus, Revista do Grupo Polis Educacional, Ano VI, nº 8, Jan-Mar, 2010. P. 62-77. Disponível: <http://www.revistaintellectus.com.br/artigos/8.88.pdf>. Acesso em: 27/12/2021.

PEREIRA, D.H.M.; PEREIRA, D.H.M.; ROLIM, T.L.; FERREIRA, R.A.S. **Análise das Tensões Residuais Utilizando o Método DPC na Soldagem Multipasse do Aço ASTM A131 AH36 pelos Processos SMAW e FCAW.** Soldagem & Inspeção. 2020. V. 25: e2513. Disponível: <https://www.scielo.br/j/si/a/f9ZBprZ4kTMM4z9df5JbyCB/?lang=pt>. Acesso em: 15/11/2021. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.13>

PINHEIRO, M.A; BRACARENSE, A.Q. **Crescimento de camada intermetálica na soldagem por fricção rotativa de alumínio e aço, assistida com preaquecimento por indução eletromagnética.** Soldagem & Inspeção. 2021;26:e2542. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.42>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/JLgvdP3xfzXx7vTNcnDvHQQ/?lang=pt>. Acesso em: 01/11/2021.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJÖ, G. **Welding Robots: technology, system issues and applications.** 1 ed. Springer, 2005, 200 p.

RODAS, A.; ALVES, D.; ARAÚJO, G.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.; PALMEIRA, P.; GONÇALVES, L. Soldagem robótica aplicada a indústria automobilística: a evolução e processos adaptativos para o desenvolvimento do setor. **Ciências exatas e tecnológicas,** Maceió, v. 1, n. 1, p. 85-98, mai. 2014. Disponível em: [www.periodicos.set.edu.br](http://www.periodicos.set.edu.br). Acesso em: 11/10/2021.

RODRIGUES, Mônica Aparecida; SILVA, Priscilla Pereira; GUERRA, Wendel. **Química nova na escola,** v. 34, n. 3, p.161-162, 2012. Disponível em: [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34\\_3/10-EQ-37-10.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34_3/10-EQ-37-10.pdf). Acesso em: 25/09/2021.

- SAMUELS, L.E., *et al.* **Metallography and Microstructures**, ASM HANDBOOK. Vol.9. ASM International, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/130155/000976164.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01/07/2022.
- SHAHID, Muhammad Bilal; HAN, Seung-Chang; JUN, Tea-Sung; PARK, Dong-Sam. **Effect of process parameters on the joint strength in ultrasonic welding of Cu and Ni foils**. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019. DOI: 10.1080/10426914.2019.1643474. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1643474>. Acesso em: 18/04/2022.
- SHAKIL, M.; TARIQ, N.H.; AHMAD, M.; CHOUDHARY, M.A.; AKHTERM, J.I.; BABU, S.S. **Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints**. *Materials and Design*, V. 55, p. 263-273, 2014.
- SHAYAKHMETOVA, E.R.; MUKHAMETGALINA, A.A.; MURZINOVA, M.A.; NAZAROV, A.A. **Study of solid state joints of copper processed by ultrasonic welding**. *Materials Physics and Mechanics*, V. 47, p. 569-576, 2021
- SIDDANI, J.K; SRINIVAS, C.; REDDY, N.M.M.; NAIK, L.S. **Investigation of process parameters of ultrasonic welding of copper using Taguchi and grey relational analysis**. *Materials today: proceedings*. V. 44, p. 827-831, 2021. Acesso em: 25/12/2022.
- SILVA, L. A.; Victor, M. M.; LOPES, W. A.; CUNHA, Silvio. **Química nova**, v. 42, n. 10, p.1154-1161, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bbmWKK9cHSLRrnnrJ3BX3sr/?lang=pt>. Acesso em: 25/09/2021.
- SILVA, R.H.G.; SILVA, R.G.N.; SCHWEDERSKY, M.B.; DALPIAZ, G.; DUTRA, J.C. **Contributions of the high frequency dynamic wire feeding in the GTAW process for increased robustness**. *Soldagem & Inspeção*. 2019; V. 24: e2430. Disponível: <https://www.scielo.br/j/si/a/3KbhRLFjSVdqXYz94jppjWPD/?lang=en>. Acesso em: 15/11/2021. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.30>
- SOUZA, D.; TAVARES, A.; COSTA, H.; OSÓRIO, A. **Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura e resistência à corrosão de revestimentos de Inconel 625 aplicados pelo processo GMAW**. *Revista Matéria*. 2020; V.25, N.02
- TAVARES, Sheron Stephany; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem de Topo por Fricção entre a Liga de Alumínio 6351-T6 e o Aço SAE 1020 Assistida por Indução Eletromagnética**. *Soldagem & Inspeção*. 2017. V. 22, N.01. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/DKYr6fCJLkHdKsWcpzKwpm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12/10/2022.
- TYLECOTE, R. F.; **The solid phase welding of metals**, New York, St. Martin's Press, 1968.
- WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fabio Decourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher [S.l: s.n.], 2002.
- Y. LONG; B. HE; W. CUI; Y. JI; X. ZHUANG; J. TWIEFEL. *Mater. Des.* 192 (2020).

YE, FUXING; LU, HEWAN; QI, HANG. **Joints formation and bonding mechanism of ultrasonic welded multi-strand single core copper cables with copper terminals.** Materials Letters. V. 327. 2022. Acesso em: 25/12/2022.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. Soldagem. São Paulo: SENAI; 1997. (Coleção Tecnológica SENAI).

## ANEXO A – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 30 DIAS

TABELA DE CONTROLE DE TESTE DE TEMPERATURA, UMIDADE E ENVELHECIMENTO ACCELERADO (PF.90303)																							
Projeto: 1 mês																							
<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.1</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.2</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA</b>																	
INÍCIO: ***** FIM: 28/06/21			INÍCIO: FIM:			5.1.1 TOTAL DE HORAS 1,32																	
2 CICLOS			2 CICLOS			5.1.2 TOTAL DE HORAS 1,32																	
TEMPERATURA			TEMPERATURA			TOTAL GERAL: 2,64																	
-40° C 0,4224 <b>2,167</b>			- 40° C 0,4224 <b>2,2</b>			32%																	
85° C 0,858 <b>4,25</b>			85° C 0,858 <b>4,3</b>			68%																	
23° C 0,0396 <b>0,25</b>			23° C 0,0396 <b>0,3</b>			3%																	
<b>1º CICLO : ESTUFA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
<b>ESTUFA: 8 MINUTOS 85° C</b>					<b>FREEZER: 8 MIN (-40 ± 3)° C</b>					<b>TEMPO DE REPOUSO: 2 MIN (23 ± 5)° C</b>													
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA								
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA							
1	12/10/21	10:00	10:08	12/10/21	10:08	10:16	12/10/21	10:24	10:32	12/10/21	10:40	12/10/21	11:04	11:12	12/10/21	11:20							
2	12/10/21	10:16	10:24	12/10/21	10:24	10:32	12/10/21	10:40	10:48	12/10/21	11:04	11:12	12/10/21	11:20	11:28								
3	12/10/21	10:32	10:40	12/10/21	10:40	10:48	12/10/21	11:04	11:12	12/10/21	11:20	11:28											
4	12/10/21	10:56	11:04	12/10/21	11:04	11:12	12/10/21	11:20	11:28														
5	12/10/21	11:12	11:20	12/10/21	11:20	11:28																	
<b>2º CICLO : CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
<b>CÂMARA ÚMIDA - 5 MINUTOS A (40 ± 3)° C</b>					<b>FREEZER - 1 MINUTOS (-40 ± 3)° C</b>					<b>TEMPO DE REPOUSO - 40 SEGUNDOS (23 ± 5)° C</b>					<b>NA ESTUFA - 1 MIN E 15 S MINUTOS (105)° C</b>								
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA								
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA							
1	12/10/21	11:36	12/10/21	11:41	12/10/21	11:41	11:42	12/10/21	11:43	12/10/21	11:43	12/10/21	11:43	11:45	12/10/21	11:46							
2	12/10/21	11:46	12/10/21	11:51	12/10/21	11:51	11:56	12/10/21	11:57	12/10/21	11:57	12/10/21	11:57	11:59	12/10/21	12:00							
3	12/10/21	12:00	12/10/21	12:05	12/10/21	12:05	12:06	12/10/21	12:06	12/10/21	12:07	12/10/21	12:07	12:09	12/10/21	12:10							
4	12/10/21	12:10	12/10/21	12:15	12/10/21	12:15	12:16	12/10/21	12:16	12/10/21	12:17	12/10/21	12:17	12:19	12/10/21	12:20							
5	12/10/21	12:20	12/10/21	12:25	12/10/21	12:25	12:26	12/10/21	12:26	12/10/21	12:27	12/10/21	12:27	12:29	12/10/21	12:30							
<b>3º CICLO : ESTUFA → CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
<b>TEMPO NA ESTUFA 2 - 1h16min A TEMPERATURA 85° C</b>					<b>1º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>					<b>2º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>					<b>3º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>								
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA		
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA		
12/10/21			12/10/21			12/10/21			12/10/21			12/10/21			12/10/21		12/10/21			12/10/21			
REPPRES (x 1440)																							
#DIV/0! 2,64 1,32																							
#DIV/0! 7,32 1,584																							
#DIV/0! 13,2																							
0,00																							
<b>TOTAL GERAL: 0</b>																							

## ANEXO B – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 60 DIAS

TABELA DE CONTROLE DE TESTE DE TEMPERATURA, UMIDADE E ENVELHECIMENTO ACCELERADO (PF.90303)														
Projeto: 2 meses														
<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.1</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.2</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA</b>								
INÍCIO: *****		FIM: 28/06/21		INÍCIO:		FIM:		5.1.1 TOTAL DE HORAS		1,32				
2 CICLOS		2 CICLOS		2 CICLOS		2 CICLOS		5.1.2 TOTAL DE HORAS		1,32				
TEMPERATURA	TEMPO	Min	TEMPERATURA	TEMPO	Min	TEMPERATURA	TEMPO	Min	TOTAL GERAL:	2,64				
-40° C	0,4224	4,333	-40° C	0,4224	4,3				32%					
85° C	0,858	8,5	85° C	0,858	8,5				68%					
23° C	0,0396	0,5	23° C	0,0396	0,5				2%					
<b>1º CICLO : ESTUFA → FREEZER → ESTUFA</b>														
<b>ESTUFA : 16 MINUTOS 85° C</b>			<b>FREEZER : 16 MIN (-40 ± 3)° C</b>			<b>TEMPO DE REPOUSO : 4 MIN (23 ± 5)° C</b>								
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA						
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA						
1	02/08/21	12:00	12:16			02/08/21	12:16	12:32						
2	02/08/21	12:50	13:06			02/08/21	13:06	13:22						
3	02/08/21	13:22	13:36			03/08/21	13:36	13:52						
4	03/08/21	13:52	14:08			03/08/21	14:08	14:24						
5	03/08/21	14:46	14:56			03/08/21	14:56	15:12						
									33% 2,68 1,34 0,335					
<b>2º CICLO : CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>														
<b>CÂMARA ÚMIDA – 10 MINUTOS A (40 ± 3)° C</b>			<b>FREEZER – 2 MINUTOS (-40 ± 3)° C</b>			<b>TEMPO DE REPOUSO – 1 MIN 20 S (23 ± 3)° C</b>			<b>TEMPO NA ESTUFA : 2 MIN E 30 S (105 ± 3)° C</b>			<b>TEMPO DE REPOUSO : 1 MIN 20 S (23 ± 3)° C</b>		
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA
1	03/08/21	15:12	04/08/21	15:22		04/08/21	15:22	15:24	04/08/21	15:26	15:28	04/08/21	15:28	15:30
2	04/08/21	15:30	05/08/21	15:40		05/08/21	15:40	15:42	05/08/21	15:44	15:47	05/08/21	15:47	15:49
3	05/08/21	15:50	06/08/21	16:00		06/08/21	16:00	16:02	06/08/21	16:04	16:06	06/08/21	16:06	16:08
4	06/08/21	16:10	07/08/21	16:20		07/08/21	16:20	16:22	07/08/21	16:24	16:26	07/08/21	16:26	16:28
5	07/08/21	07:36	08/08/21	07:46		08/08/21	07:46	07:48	08/08/21	07:50	07:53	08/08/21	07:53	07:55
<b>3º CICLO : ESTUFA → CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>														
<b>TEMPO NA ESTUFA 2 – 2h32min A TEMPERATURA 85° C</b>			<b>1º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>			<b>2º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>			<b>3º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>			<b>TOTAL GERAL:</b>		
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA									
DATA	HORA	HORA	DATA	HORA	HORA									
08/08/21		23	16/08/21		18									
REPPRES D: TEMPO 1440														
#DIV/0! 2,64 1,32														
#DIV/0! 7,32 1,584														
#DIV/0! 13,2														
0,00														

## ANEXO C – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 90 DIAS

TABELA DE CONTROLE DE TESTE DE TEMPERATURA, UMIDADE E ENVELHECIMENTO ACELERADO (PF.90303)																			
Projeto: 3 meses																			
<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.1</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.2</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA</b>													
INÍCIO: ##### FIM: 28/08/21			INÍCIO: FIM:			5.1.1 TOTAL DE HORAS: 1,32			5.1.2 TOTAL DE HORAS: 1,32										
2 CICLOS			2 CICLOS			TOTAL GERAL: 2,64													
TEMPERATURA	TEMPO	MIn	TEMPERATURA	TEMPO	MIn														
-40 C	0,4224	6,5	-40 C	0,4224	6,5	32%													
85 C	0,858	12,8	85 C	0,858	13	65%													
23 C	0,0396	0,75	23 C	0,0396	0,8	3%													
<b>1º CICLO : ESTUFA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>ESTUFA: 23,5 MINUTOS 85 C</b>				<b>FREEZER: 23,5 MIN (-40 ± 3) C</b>				<b>TEMPO DE REPOUSO: 5 MIN (23 ± 5) C</b>											
ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA									
DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA									
02/08/21				02/08/21				03/08/21	22	23									
02/08/21				02/08/21				03/08/21											
02/08/21				03/08/21				03/08/21											
03/08/21				03/08/21				03/08/21											
03/08/21				03/08/21															
<b>2º CICLO : CÂMARA ÚMIDA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>CÂMARA ÚMIDA - 13,75 MINUTOS A (40 ± 3)</b>				<b>FREEZER - 3 MINUTOS (-40 ± 3) C</b>				<b>MPO DE REPOUSO - 2 MINUTOS (23 ± 3)</b>				<b>MPO NA ESTUFA - 3,75 MINUTOS (105 ± 3)</b>				<b>MPO DE REPOUSO - 2 MINUTOS (23 ± 3)</b>			
ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA	
DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA
03/08/21		04/08/21		04/08/21		05/08/21		04/08/21		05/08/21		04/08/21		05/08/21		06/08/21		06/08/21	
04/08/21		05/08/21		05/08/21		06/08/21		05/08/21		06/08/21		06/08/21		07/08/21		07/08/21		07/08/21	
05/08/21		06/08/21		06/08/21		07/08/21		06/08/21		07/08/21		07/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21	
06/08/21		07/08/21		07/08/21		08/08/21		07/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21	
07/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21		08/08/21	
<b>3º CICLO : ESTUFA – CÂMARA ÚMIDA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>TEMPO NA ESTUFA 2 - 3h48min A TEMPERATURA 85 C</b>				<b>1º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>				<b>2º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>				<b>3º CICLO TOTAL DE HORAS:</b>							
ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA		ENTRADA		SAÍDA	
DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA
08/08/21	23			16/08/21															
<b>TOTAL GERAL: 0</b>																			
REPPRES. (% 1 ANO) #DIV09 2,64 1,32 #DIV09 7,92 1,584 #DIV09 13,2 0,00																			

## ANEXO D – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 180 DIAS

TABELA DE CONTROLE DE TESTE DE TEMPERATURA, UMIDADE E ENVELHECIMENTO ACELERADO (PF.90303)																							
Projeto: 6 meses																							
<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.1</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.2</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA</b>																	
INÍCIO: ***** FIM: 28/06/21			INÍCIO: FIM:			5.1.1 TOTAL DE HORAS 1,32			5.1.2 TOTAL DE HORAS 1,32														
2 CICLOS			2 CICLOS			TOTAL GERAL: 2,64																	
TEMPERATURA	TEMPO	Min	TEMPERATURA	TEMPO	Min	32%																	
-40° C	0,4224	13	-40° C	0,4224	13	68%																	
85° C	0,858	25,5	85° C	0,858	26	3%																	
23° C	0,0396	1,5	23° C	0,0396	1,5																		
<b>1º CICLO : ESTUFA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
ESTUFA: 47 MINUTOS 85° C				FREEZER: 47 MIN (-40 ± 3)° C				TEMPO DE REPOUSO: 10 MIN (23 ± 5)° C															
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA														
DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA												
1	14/10/21	11:34	12:21			14/10/21	12:21	13:08															
2	14/10/21	13:08	13:55			14/10/21	13:55	14:42															
3	14/10/21	14:42	15:24			15/10/21	15:23	06:47															
4	15/10/21	07:34	08:21			15/10/21	09:08	09:55															
5	15/10/21	10:42	11:29			15/10/21	11:29	12:16															
<b>2º CICLO : CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
CÂMARA ÚMIDA - 27,5 MINUTOS A (40 ± 3)° C				FREEZER - 6 MINUTOS (-40 ± 3)° C				TEMPO DE REPOUSO - 4 MINUTOS (23 ± 3)° C				TEMPO NA ESTUFA - 6,5 MINUTOS (105 ± 3)° C				TEMPO DE REPOUSO - 4 MINUTOS (23 ± 3)° C							
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA		
DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA
1	15/10/21	13:18	16/10/21	13:44		16/10/21	13:44	13:50			16/10/21	13:54	14:02		16/10/21	14:02	14:06			16/10/21	14:02	14:06	
2	16/10/21	14:06	17/10/21	14:33		17/10/21	14:33	14:39			17/10/21	14:43	14:50		17/10/21	14:50	14:54			17/10/21	14:50	14:54	
3	17/10/21	06:30	18/10/21	06:58		18/10/21	06:58	07:04			18/10/21	07:04	07:08		18/10/21	07:08	07:15			18/10/21	07:15	07:19	
4	18/10/21	07:19	19/10/21	07:47		19/10/21	07:47	07:53			19/10/21	07:53	07:57		19/10/21	07:57	08:04			19/10/21	08:04	08:08	
5	19/10/21	08:08	20/10/21	08:36		20/10/21	08:36	08:42			20/10/21	08:42	08:46		20/10/21	08:46	08:53			20/10/21	08:53	08:57	
<b>3º CICLO : ESTUFA → CÂMARA ÚMIDA → FREEZER → ESTUFA</b>																							
TEMPO NA ESTUFA 2 - 7h36min A TEMPERATURA 85° C																							
ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA			ENTRADA			SAÍDA								
DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA	DATA	HORA	MATRÍCULA						
20/10/21		23				28/10/21		18															
						<b>1º CICLO</b> TOTAL DE HORAS:						<b>REPPRES. D:</b>											
						2,64						TEMPO											
						<b>2º CICLO</b> TOTAL DE HORAS:						*NDV/O/ 2,64 1,32											
						7,92						*NDV/O/ 7,92 1,584											
						<b>3º CICLO</b> TOTAL DE HORAS:						*NDV/O/ 13,2											
						13,2						0,00											
						<b>TOTAL GERAL:</b>						0											

## ANEXO E – PARÂMETRO DE ENVELHECIMENTO PARA 360 DIAS

TABELA DE CONTROLE DE TESTE DE TEMPERATURA, UMIDADE E ENVELHECIMENTO ACELERADO (PF. 90303)																			
Projeto: 1 ano																			
<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.1</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA 5.1.2</b>			<b>CÂMARA CLIMÁTICA</b>													
INÍCIO: ##### FIM: 28/06/21			INÍCIO: FIM:			5.1.1 TOTAL DE HORAS: 132			5.1.2 TOTAL DE HORAS: 132										
2 CICLOS			2 CICLOS			TOTAL GERAL: 264													
TEMPERATURA	TEMPO	Min	TEMPERATURA	TEMPO	Min														
-40 C	0,4224	26	-40 C	0,4224	26	32%													
85 C	0,858	51	85 C	0,858	51	6%													
23 C	0,0396	3	23 C	0,0396	3	3%													
<b>1º CICLO : ESTUFA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>ESTUFA: 1 HORA E 34 MIN 85 °C</b>				<b>FREEZER: 1 HORA E 34 MIN (-40 ± 3) °C</b>				<b>TEMPO DE REPOUSO: 20 MIN (23 ± 5) °C</b>											
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA									
DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA									
1	15/10/21	07:42	09:36	OK	16/10/21	08:36	10:50	OK	16/10/21	22	23								
2	15/10/21	10:50	11:24	OK	16/10/21	11:24	12:58	OK	33% 2,68 1,34 0,335										
3	15/10/21	12:58	14:32	OK	16/10/21	14:32	16:06	OK											
4	16/10/21	06:00	07:34	OK	16/10/21	07:34	09:09	OK											
5	16/10/21	09:08	10:42	OK	16/10/21	10:42	12:16	OK											
<b>2º CICLO : CÂMARA ÚMIDA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>CÂMARA ÚMIDA - 55 MINUTOS A (40 ± 3) °C</b>				<b>FREEZER - 12 MINUTOS (-40 ± 3) °C</b>				<b>MPO DE REPOUSO - 8 MINUTOS (23 ± 3) °C</b>				<b>MPO NA ESTUFA - 13 MINUTOS (105 ± 3) °C</b>				<b>MPO DE REPOUSO - 8 MINUTOS (23 ± 3) °C</b>			
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA	
DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA		DATA	HORA	HORA	
1	16/10/21	12:16	17/10/21	13:06	17/10/21	13:06	13:18	17/10/21	13:18	13:26		17/10/21	13:26	13:39		17/10/21	13:39	13:47	
2	17/10/21	13:47	18/10/21	14:42	18/10/21	14:42	14:54	18/10/21	14:54	15:02		18/10/21	15:02	15:15		18/10/21	15:15	15:23	
3	18/10/21	06:00	19/10/21	06:55	19/10/21	06:55	07:07	19/10/21	07:07	07:15		19/10/21	07:15	07:28		19/10/21	07:28	07:36	
4	19/10/21	07:36	20/10/21	08:31	20/10/21	08:31	08:43	20/10/21	08:43	08:51		20/10/21	08:51	09:04		20/10/21	09:04	09:12	
5	20/10/21	09:12	21/10/21	10:07	21/10/21	10:07	10:19	21/10/21	10:19	10:27		21/10/21	10:27	10:40		21/10/21	10:40	10:48	
<b>3º CICLO : ESTUFA – CÂMARA ÚMIDA – FREEZER – ESTUFA</b>																			
<b>TEMPO NA ESTUFA 2 - 15h12min A TEMPERATURA 85 °C</b>				<b>1º CICLO TOTAL DE HORAS: 41</b>				<b>2º CICLO TOTAL DE HORAS: 120</b>				<b>3º CICLO TOTAL DE HORAS: 200</b>							
ENTRADA	SAÍDA	MATRÍCULA		DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA	DATA	HORA
21/10/21	23			23/10/21	18														
REPPRES (% 1480)																			
1%: 2,64 1,32																			
33%: 7,82 1,584																			
55%: 13,2																			
15,04																			