

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS ALEGRETE  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA SOLDAGEM FSSW EM LIGA DE  
ALUMÍNIO 6063-T5**

**ALEGRETE  
2022**

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA SOLDAGEM FSSW EM LIGA DE  
ALUMÍNIO 6063-T5**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação *Scripto Sensu* em Engenharia, Área de Concentração em Tecnologia de Materiais, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**Alegrete  
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S586a Silva, Enrique Leal

Análise do desempenho mecânico da soldagem FSSW em  
liga de alumínio 6063-T5 / Enrique Leal da Silva.

78 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do  
Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.

"Orientação: Tonilson de Souza Rosendo".

1. FSSW. 2. Soldagem. 3. Liga de Alumínio. I.  
Título.

**ENRIQUE LEAL DA SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DA SOLDAGEM FSSW DA LIGA DE ALUMÍNIO  
6063-T5**

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPEng) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia dos Materiais e Meio Ambiente.

Dissertação defendida e aprovada em: 24 de outubro de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Aldoni Wiedenhöft  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/01/2023, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/01/2023, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/01/2023, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1023398** e o código CRC **BCB64ACA**.

Dedico este trabalho ao meu pai  
Ademir, minha mãe Luciara, meu  
irmão Bernardo e minha noiva Jéssica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui e me conceder mais essa oportunidade. Agradeço aos meus pais Ademir e Luciara por todo suporte e incentivo durante toda a minha formação, ao meu irmão Bernardo por estar sempre me apoiando independentemente da situação. A minha noiva Jéssica por me incentivar durante toda a caminhada, estar sempre ao meu lado nos momentos turbulentos e

Gostaria de agradecer ao meu orientador o professor Tonilson Rosendo por todo suporte e ensinamentos para a realização desse estudo em todas as etapas. Ao professor Aldoni Wiedenhof e ao Mestre Dieison Fantineli que sempre estiveram dispostos a contribuir com o trabalho de todas as formas.

A todos colegas, que de alguma forma, colaboraram para a concretização deste trabalho.

À UNIPAMPA e ao PPENG que proporcionaram um excelente curso de mestrado com todo o conhecimento necessário para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.”

Nelson Mandela



## RESUMO

O mercado industrial tem cada vez mais se direcionado para a sustentabilidade, e com isso, as pesquisas sobre tecnologia de materiais tem crescido nesse cenário. A redução da massa geral dos produtos têm sido uma tendência, utilizando ligas leves e restringindo custos. Por esse motivo, a Soldagem Ponto Fricção e Mistura Mecânica (*Friction Stir Spot Welding* - FSSW) em ligas de alumínio é uma técnica mais acessível e eficiente. O processo consiste na união pontual de juntas sobrepostas no estado sólido. Como não ocorre fusão entre as chapas unidas, evitam-se alguns problemas atrelados aos fenômenos de fusão e solidificação, típicos de processos de soldagem convencional. Por essa razão, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de juntas sobrepostas de alumínio AA6063-T5 soldadas pelo processo FSSW. A metodologia utilizada no estudo foi a pesquisa experimental, onde foram soldadas chapas de alumínio que passaram por análise através de ensaios mecânicos de controle de força axial e temperatura, resistência ao cisalhamento, microdureza e testes metalográficos. Os parâmetros de processo avaliados foram velocidade de rotação e tempo de permanência com três níveis cada, com uma velocidade de penetração constante. Os resultados obtidos indicaram amostras soldadas com qualidade para a liga e os equipamentos escolhidos nesse trabalho. A aplicação desse processo ocasionou melhora no desempenho das propriedades mecânicas do material e mostrou a importância dos parâmetros de soldagem analisados.

Palavras-chave: FSSW. Liga de Alumínio. Soldagem.

## **ABSTRACT**

The industrial market has focused on sustainability, Therefore, research on materials technology has increased in this area. Reducing the weight of products has been a trend, using light alloys and reducing costs. For this reason, Friction Stir Spot Welding on aluminum alloys is a cheaper and more efficient technique. The process is a point joining of overlapping joints in the solid state. As there is no fusion between the joined sheets, problems with fusion and solidification are avoided, as occurs in conventional welding processes. For this reason, the present work aims to evaluate the mechanical performance of AA6063-T5 aluminum lap joints welded by the FSSW process. The methodology used in the study was experimental research, where aluminum sheets were welded that underwent analysis through mechanical tests of axial force and temperature control, shear strength, microhardness and metallographic tests. The process parameters evaluated were rotational speed and dwell time with three levels each and a constant plunge rate. The results obtained indicated quality welded samples for the alloy and the equipment chosen in this work. The application of this process resulted in an improvement in the performance of the material's mechanical properties and showed the importance of the welding parameters analyzed.

Keywords: FSSW. Aluminum Alloy. Welding

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do processo Refill FSSW .....	20
Figura 2 – Modos de fratura de juntas sobrepostas de AA6181-T4 soldadas pelo processo Refill FSSW: (a) extração parcial com rasgo (b) através da solda.....	20
Figura 3 – Desenho esquemático FSSW .....	21
Figura 4 – Etapas do Processo FSSW .....	23
Figura 5 – Macrografia da soldagem FSSW.....	25
Figura 6 – Zonas de solda.....	25
Figura 7 – Defeitos da soldagem.....	27
Figura 8 – Intervalo de Confiança da ANOVA .....	31
Figura 9 - Mapa conceitual do delineamento da pesquisa .....	33
Figura 10 - Fluxograma de atividades .....	34
Figura 11 – Modelo dos corpos de prova .....	35
Figura 12 – Cortadora metalográfica .....	35
Figura 13 – Ferramenta de soldagem .....	36
Figura 14 – Centro de usinagem CNC .....	37
Figura 15 – Equipamento de soldagem no centro de usinagem CNC: (a) gabarito de soldagem e (b) setup utilizado nas soldagens.....	37
Figura 16 – Disposição dos termopares.....	38
Figura 17 – Detalhe mostrando o gabarito de soldagem, chapas, célula de carga e cabeamento dos termopares.....	38
Figura 18 – Ensaio de Cisalhamento: (a) máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X e (b) detalhe de um corpo de prova durante ensaio de cisalhamento.....	40
Figura 19 – Microdurômetro Buehler, modelo Micromet 6010.....	41
Figura 20 – Seção transversal da solda com os pontos de medição de microdureza.....	41
Figura 21 – Estereoscópio Kontrol modelo XTL.....	42
Figura 22 – Vista superior de corpos de prova soldados pelo processo FSSW .....	43
Figura 23 – Força axial máxima em S1000 .....	44
Figura 24 – Força axial máxima em S2000 .....	45
Figura 25 – Força axial máxima em S3000 .....	45
Figura 26 - Perfil de Força Axial para S1000_T0 .....	45
Figura 27 - Interação dos Parâmetros VR e TP na Força Axial.....	47
Figura 28 - Perfil de Temperatura S1000_T0 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	48
Figura 29 - Perfil de Temperatura S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	48
Figura 30 - Perfil de Temperatura S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	49
Figura 31 - Resultado do ensaio de cisalhamento S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	51
Figura 32 - Resultado do ensaio de cisalhamento S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	52
Figura 33 - Resultado do ensaio de cisalhamento S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4.....	53
Figura 34 – Resistência ao cisalhamento (a) S1000 (b) S2000 (c) S3000 .....	54
Figura 35 - Interação dos Parâmetros VR e TP para o ensaio de cisalhamento.....	55
Figura 36 - Perfil de Microdureza S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	56
Figura 37 - Perfil de Microdureza S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	57
Figura 38 - Perfil de Microdureza S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	58
Figura 39 – S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	59
Figura 40 – S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	60
Figura 41 - S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4 .....	61
Figura 42 - Perfis de força axial.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das Ligas de Alumínio .....	29
Tabela 2 – Composição química da liga AA6063-T5 .....	35
Tabela 3 - Combinações de soldagem.....	39
Tabela 4 – Resultados da força axial de soldagem.....	46
Tabela 5 – ANOVA da Força Axial .....	46
Tabela 6 – Resultados de Temperatura média máxima no pino e no ombro .....	50
Tabela 7 – ANOVA da Temperatura máxima no pino (Termopar 1) .....	50
Tabela 8 – ANOVA da Temperatura máxima no ombro (Termopar 2) .....	51
Tabela 9 – Carga e Alongamento máximos .....	54
Tabela 10 – ANOVA para o Ensaio de resistência ao cisalhamento.....	55

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 <b>Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.2 <b>Hipóteses</b> .....	<b>15</b>
1.3 <b>Justificativa</b> .....	<b>16</b>
1.4 <b>Estrutura do Trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 <b>Soldagem</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Soldagem convencional.....	17
2.1.2 Soldagem no estado sólido.....	18
2.2 <b>Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Microestrutura no processo FSSW .....	24
2.2.2 Parâmetros de processo e resistência da junta .....	26
2.2.3 Defeitos de soldagem .....	27
2.2.4 Força e temperatura no processo FSSW.....	28
2.3 <b>Liga de Alumínio 6063-T5</b> .....	<b>29</b>
2.4 <b>Análise de Variância (ANOVA)</b> .....	<b>30</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
3.1 <b>Questionamentos da Pesquisa</b> .....	<b>32</b>
3.2 <b>Delineamento da Pesquisa</b> .....	<b>32</b>
3.3 <b>Forma de coleta de dados</b> .....	<b>33</b>
3.3.1 Corpos de prova .....	34
3.3.2 Ferramenta de soldagem.....	36
3.3.3 Setup de soldagem.....	36
3.3.4 Parâmetros de soldagem.....	39
3.4 <b>Forma de tratamento dos dados</b> .....	<b>39</b>
3.4.1 Ensaios Mecânicos .....	40
3.4.2 Análise Metalográfica.....	41
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
4.1 <b>Força e Temperatura</b> .....	<b>44</b>
4.2 <b>Resistência ao Cisalhamento</b> .....	<b>51</b>
4.3 <b>Microdureza</b> .....	<b>56</b>

<b>4.4 Análise Metalográfica.....</b>	<b>59</b>
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>62</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor industrial do Brasil vem sofrendo grandes evoluções nos últimos anos, principalmente na questão da sustentabilidade. Os materiais precisam ser escolhidos de maneira mais criteriosa a fim de reduzir a emissão de poluição no meio ambiente. LI *et al.* (2020) explicam que o emprego de ligas de alumínio nesse mercado tem se mostrado mais eficiente na substituição de ligas de aço, pois torna os veículos mais leves e mais sustentáveis.

Segundo SURYANARAYANAN e SRIDHAR (2020) as últimas tendências da indústria automotiva levam para a redução da massa geral dos veículos para melhorar o desempenho, o que induziu ao aumento do uso de ligas leves. Como as séries de alumínio Al 5000 e Al 6000 são amplamente utilizadas em estruturas de automóveis, como na carroceria, painéis interno e externo e extrusões devido à sua excelente soldabilidade e resistência superior à corrosão.

Dentro desse contexto, as pesquisas da área de tecnologia de materiais buscam utilizar os conceitos teóricos e técnicos a fim de elevar a qualidade dos materiais. Por isso, o tema de pesquisa a ser discutido envolve um método de soldagem no estado sólido chamado de Soldagem Ponto Fricção e Mistura Mecânica (*Friction Stir Spot Welding - FSSW*) em um liga de alumínio.

De acordo com ROSENDO (2009) a soldagem FSSW (*Friction Stir Spot Welding*), introduzida em 2003 pela *Mazda Motor Corporation*, deriva do processo FSW (*Friction Stir Welding – FSW*), este desenvolvido pelo TWI na Inglaterra em 1991. O processo FSSW foi desenvolvido pela *Mazda Motor Corp.* em parceria com a *Kawasaki Heavy Industries* em 2003, para unir os painéis de porta e capô de alumínio com 1 mm de espessura com tempo de soldagem reduzido e com baixo consumo de energia, conforme SURYANARAYANAN e SRIDHAR (2020). O processo consiste na união pontual de juntas sobrepostas no estado sólido. Como não acontece fusão entre as chapas soldadas, evitam-se alguns problemas atrelados aos fenômenos de fusão e solidificação, típicos de processos de soldagem convencional. ROSENDO (2009) explica que esse procedimento utiliza uma ferramenta cilíndrica constituída por uma parte maior chamada de ombro e uma ponta menor chamada de pino, muito semelhante àquela usada no processo FSW.

Conforme LI *et al.* (2020) uma das diferenças entre o FSW e o FSSW está no fato de que no FSSW não se utiliza um ângulo de inclinação entre a ferramenta e as chapas, tampouco há movimento transversal. Por ter um movimento puramente axial (de penetração) em direção às chapas dispostas de forma sobrepostas (no FSW as

chapas posicionam-se em topo), a distribuição de temperatura e o fluxo de material diferem entre os dois processos.

A soldagem no estado sólido (FSSW), conforme AITA (2017) vem ganhando espaço no setor industrial nas últimas duas décadas, todavia ainda são necessários estudos para melhor entendimento do processo e sua otimização para diferentes ligas. AITA (2017) ainda explica que a condição de adesão entre a ferramenta e o material durante o processo é fundamental na soldagem FSSW pois dela deriva a deformação plástica e, por conseguinte, a temperatura e o fluxo de material na soldagem.

Por isso, é necessário ampliar os estudos a respeito das características de formação das juntas soldadas, das propriedades metalúrgicas e mecânicas e da influência dos parâmetros de soldagem no resultado final da junta. Dentro desse contexto, as pesquisas da área de tecnologia de materiais buscam utilizar os conceitos teóricos e técnicos a fim de elevar a qualidade dos materiais e técnicas de fabricação, como a soldagem FSSW, por exemplo. O presente trabalho busca investigar o processo FSSW aplicado à liga de alumínio AA6063-T5, uma liga de baixo custo e que tem aplicações estruturais, principalmente no setor automotivo.

### **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste estudo é avaliar o desempenho mecânico de juntas sobrepostas de alumínio AA6063-T5 soldadas pelo processo FSSW.

Quanto aos objetivos específicos têm-se:

- Avaliar o perfil de força axial e de temperatura durante a soldagem;
- Analisar os efeitos dos parâmetros de processo na microestrutura da solda;
- Avaliar a resistência ao cisalhamento das juntas soldadas;
- Caracterizar e avaliar o efeito do padrão de adesão entre a ferramenta e o material durante a soldagem.

### **1.2 Hipóteses**

- A soldagem no estado sólido FSSW em alumínio AA6063-T5 tem desempenho mecânico eficiente para ser aplicado no setor industrial;
- O perfil de temperatura e de força axial durante a soldagem são bons indicadores da qualidade da solda;
- Os parâmetros de velocidade de rotação e tempo de permanência têm influência majoritária na resistência das juntas soldadas;
- O padrão de adesão ferramenta/material depende da rotação e tempo de permanência e tem efeito importante no tamanho do botão de solda.



### 1.3 Justificativa

No Brasil, diversas indústrias estão mudando suas práticas de produção para uma utilização mais sustentável, segundo SANTOS (2015) existe a expectativa de aumento de tecnologias sustentáveis e limpas. Por isso a soldagem no estado sólido, como a FSSW, que reduz peso (em comparação à rebitagem), tem menor custo de produção e é menos poluente (que solda ponto por resistência). O alumínio também é um material de menor custo e de fácil acesso, por isso foi o elemento escolhido para a pesquisa. Por ser um processo relativamente novo, pesquisas ainda são necessárias para melhor entender o processo FSSW e determinar os parâmetros ótimos para diferentes cenários e ligas. Neste contexto, é importante, por exemplo, entender como as variáveis do processo interferem na resistência mecânica das juntas soldadas, e quais configurações são melhores pensando em produção no setor industrial, de forma mais qualificada e mais eficiente.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

- Capítulo 1 – Introdução: Aborda o contexto do tema escolhido. É mencionado também o objetivo geral, os objetivos específicos e as hipóteses iniciais, assim como, a justificativa para a efetivação do trabalho;
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: expõe uma base a respeito da teoria estudada, abordando definições e conceitos que se referem ao trabalho, onde é elucidado o que já foi pesquisado na área, mostrando os resultados e contradições encontrados;
- Capítulo 3 – Materiais e métodos: são exibidos os materiais e métodos que foram empregados para praticar o procedimento experimental, o material aproveitado e a definição dos ensaios utilizados;
- Capítulo 4 – Resultados : são apresentados os resultados obtidos com foco na identificação do desempenho mecânico das juntas soldadas;
- Capítulo 5 – Discussões: são tratados e examinados os resultados.
- Capítulo 6 – Considerações Finais: neste capítulo estão indicadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo busca apresentar as informações a respeito do tema, com base no analisado nas referências, partindo de uma análise de soldagem em geral, depois delimita-se para soldagens no estado sólido, definições de cada etapa do processo FSSW. A seguir, explica-se o método estatístico escolhido para validar os dados obtidos e as características da liga de alumínio escolhida para o trabalho.

### 2.1 Soldagem

A soldagem é conhecida por ser um processo de união, principalmente entre metais, utilizado na fabricação e recuperação de peças. Segundo MARQUES *et al.* (2009), a soldagem atualmente também é empregada como deposição de material sobre superfície, com o objetivo de restaurar peças desgastadas e de desenvolver um revestimento específico.

A Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*) define de forma operacional, sem contar muito com conceituação, soldagem como “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, como, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”.

A soldagem tem sido utilizada em ligas de alumínio, segundo CAMPANELLI *et al.* (2011) para redução de peso dos materiais, pois alumínio e magnésio têm valores reduzidos de densidade e apresentam boa usinabilidade.

#### 2.1.1 Soldagem convencional

Os tipos de soldagem convencional que se assemelham com o processo em estado sólido são a solda ponto por resistência (RSW) e a solda por rebitagem. Por isso são dois processos importantes de serem abordados, no tocante a comparação com a soldagem FSSW.

A *Resistance Spot Welding (RSW)*, segundo BALDIM (2019) é definido como a união de duas ou mais peças de metal por fusão, dois eletrodos oferecem pressão e geram calor para realizar a aderência. O processo ocorre pela resistência ao fluxo de corrente elétrica que passa pelos materiais e onde o calor é provocado pelo feito joule. O autor ainda explica que a resistência de contato entre as chapas aumenta, o que gera um acréscimo acelerado de temperatura na interface, dando início a fusão dos metais e o crescimento do ponto de solda.

ZIEDAS e TATINI (1997) apresentam as vantagens da solda ponto por resistência, a velocidade elevada, a automação facilitada gerando uma alta taxa de produção, baixo custo e é um processo mais acelerado que os processos a arco elétrico e com maçarico. Porém, os autores também explicam que como desvantagem é um processo mais pesado, tem resistência a tração menor e fadiga. De acordo com RUIZ e BATALHA (2006) a soldagem a ponto ainda apresenta falhas como endentação profunda do eletrodo, fusão superficial, eletrodos depositados na peça, trincas e cavidades profundas.

Por outro lado, o processo de rebiteagem, conforme LOPES (2020), pode ser feito a quente ou à frio. Na rebiteagem à frio, o rebite é inserido no furo à temperatura ambiente. Na rebiteagem à quente, o rebite é inserido aquecido no furo, sendo que após a contração do mesmo há o aumento da força de compressão entre as peças unidas, fato que aumenta a resistência ao cisalhamento da união. O autor ainda explica que o princípio de funcionamento do processo de rebiteagem utiliza-se como elemento de fixação da união, o rebite, o qual é encaixado em furos usinados nos elementos que vão ser soldados, e tem função de transmitir os esforços entre os elementos da união.

PARRA *et al.* (2011) explicam que os processos de rebiteagem enfrentam problemas como excesso de peso, dificuldade de automação, corrosão e necessidade de produtos selantes. SIQUEIRA *et al.* (2014) também citam que uma desvantagem processo de rebiteagem é que, durante a solicitação mecânica, são ocasionados furos no revestimento afetando a integridade da estrutura.

O trabalho de SIQUEIRA *et al.* (2014) mostrou que o processo de rebiteagem pode ser substituído por processos de soldagem no estado sólido em estruturas de alumínio. As superfícies de fratura encontradas em peças rebiteadas apontam que os furos são concentradores de tensão e estão propícios a nucleação de trincas.

### 2.1.2 Soldagem no estado sólido

O conceito de unir partes por meio de soldagem no estado sólido começou no início dos anos 90. Segundo PAYTON (2005), foram pesquisadores do *The Welding Institute - TWI* no Reino Unido que desenvolveram o FSW (*Friction Stir Welding*) em 1991. Juntas de topo foram desenvolvidas através de um cordão de solda produzido totalmente no estado sólido (sem ocorrer fusão nem adição de material) pois a temperatura não alcança o ponto de fusão do material.

Segundo LI, ZHOU *et al.* (2019), o processo apresenta algumas vantagens como ausência de defeitos relacionados à fusão, porosidades típicas de soldagem por fusão, ausência de trincas à quente e inclusão de óxidos.

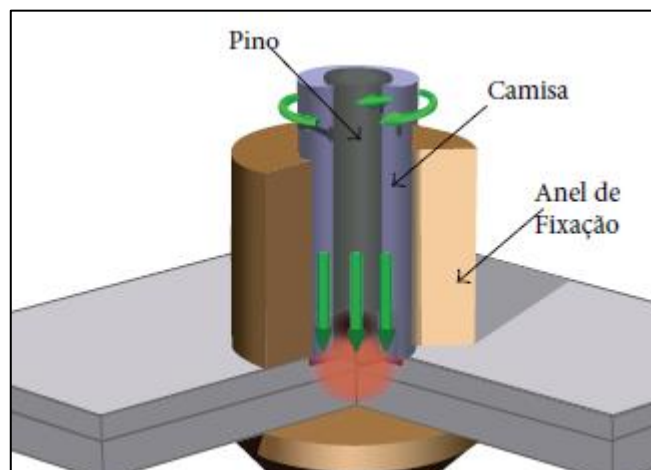
O processo funciona com objetivo de união das chapas de forma sólida, de acordo com OLIVIECKI e BESKOW (2013) a ferramenta cilíndrica entra em rotação, e é colocada nas bordas adjacentes das juntas que vão ser soldadas, cursando de forma linear a extensão da junta.

SARKAR *et al.* (2016) explicam que a soldagem FSW em ligas de alumínio aplicadas em diferentes velocidades de rotação, fazem com que a temperatura de solda gere a recristalização dinâmica mesmo com deformações plásticas pequenas. A deformação plástica é influenciada, sobretudo, pela velocidade de rotação, pela geometria da ferramenta e velocidade de translação.

A partir do FSW, de acordo com YANG *et al.* (2014) foram criadas variações do processo voltadas à união por ponto de juntas sobrepostas, como o FSSW, *Refill* FSSW e *Pinless* FSSW. O FSSW tem uma explicação mais detalhada no tópico seguinte.

O *Refill* FSSW, ainda conforme YANG *et al.* (2014) foi desenvolvido e patenteado por pesquisadores do *Helmholtz-Zentrum Hereon* (antigo GKSS) na Alemanha. O processo consiste em quatro fases: fricção, primeira extrusão, segunda extrusão e afastamento. A ferramenta é composta por três elementos: pino, camisa e anel de fixação, como pode ser visto na Figura 1. O anel de fixação segura as placas firmemente contra a base e também restringe o fluxo de material durante o processo. Pino e camisa, que são independentes e podem transladar de forma independente na direção axial, são postas em rotação. A seguir, o pino e a camisa se movem na direção oposta (um penetra as chapas enquanto o outro desloca-se para cima), criando um espaço onde o material plastificado é acomodado. Este processo é caracterizado por uma superfície super plana após a soldagem, sem ausência do furo característico deixado pela ferramenta no processo FSW.

Figura 1 – Ilustração do processo *Refill* FSSW



Fonte: Adaptado de YANG *et al.* (2014).

ROSENDO *et al.* (2015) estudaram o comportamento mecânico e a fratura de juntas sobrepostas produzidas pelo processo *Refill* FSSW. Os autores explicam como ocorrem as trincas durante o processo de fratura sob carregamento de cisalhamento. Mostraram que a resistência e o seu comportamento dúctil ou frágil da junta soldada estão relacionados à nucleação, crescimento e propagação de dois tipos de trincas: trincas circunferenciais (*circumferential crack*) e trincas anulares (*annular crack*). Trincas anulares se formam em um plano paralelo à superfície das chapas e estão associadas a rasgamento na região de ligação parcial (devido ao momento fletor sobre a junta). Esta trinca cresce através da solda. Trincas circunferenciais se formam perpendicularmente à superfície da chapa e podem nuclear na chapa superior, inferior ou nas duas. Esta trinca cresce ao redor do botão de solda. Os dois tipos de trincas podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 – Modos de fratura de juntas sobrepostas de AA6181-T4 soldadas pelo processo *Refill* FSSW: (a) extração parcial com rasgo (b) através da solda.



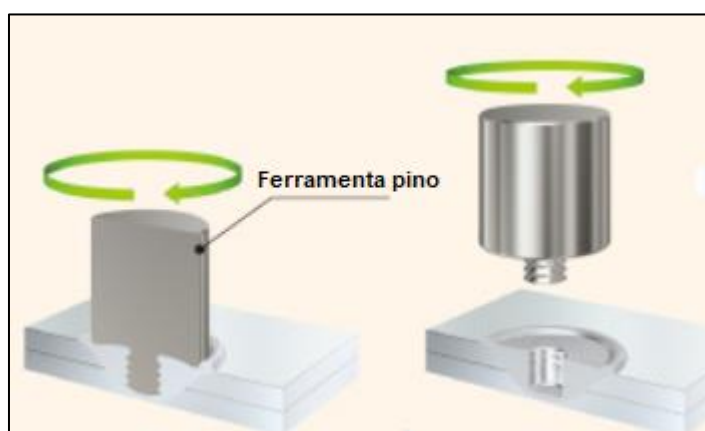
Fonte: Adaptado de ROSENDO *et al.* (2015)

## 2.2 Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica

De acordo com Rosendo (2009), o processo de soldagem *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) é uma variante do processo FSW, desenvolvido em 2001 no Japão pela *Mazda Motor Corporation* em colaboração com a *Kawasaki Heavy Industries* e destina-se à obtenção de juntas sobrepostas por ponto. De acordo com CAMPANELLI *et al.* (2011) o sistema é de mais fácil automatização e tem grande qualidade de soldagem. AITA (2017) explica que as ferramentas de soldagem nos processos FSW e FSSW se assemelham, porém no FSSW a ferramenta não realiza o movimento de translação, somente é inserida nas chapas em uma configuração de sobreposição. O cordão de solda é produzido por uma ferramenta em formato cilíndrico contendo dois diâmetros escalonados, sendo um menor na ponta (pino) e um maior (ombro) que constitui o corpo principal da ferramenta. A ferramenta é posta em rotação e posteriormente translada ao longo da interface entre as chapas posicionadas em topo.

De acordo com KHOSA *et al.* (2010), a Mazda relatou uma redução de mais de 90% no consumo de energia, em relação à técnica convencional de solda ponto por resistência, quando o FSSW foi usado para um de seus modelos de automóveis. A soldagem FSSW, segundo JEDRASIAK e SHERCLIFF (2019), é um processo de grande potencial para união de chapas em aplicações automotivas. Consiste em uma ferramenta cilíndrica rotativa feita de um material duro e resistente ao desgaste que avança axialmente contra duas placas sobrepostas e extraída após um tempo de permanência, assim como expõe a Figura 3 com um desenho esquemático do processo.

Figura 3 – Desenho esquemático FSSW



Fonte: Adaptado de UACJ *Automobile Technology*

ROSENDO *et al.* (2015) apresentam algumas vantagens do processo FSSW, tais como a compatibilidade com o ambiente (não são gerados gases), nenhum

material adicional necessário, produtos mínimos ou sem resíduos, boa qualidade da superfície, altas velocidades de processamento e facilidade de automação. Segunda a Mazda, além da economia de energia de operação, consegue-se mais de 40% de redução de investimento de capital com a implementação deste processo.

Durante o FSSW, KLOBČAR *et al.* (2015) explicam que o material sob a ferramenta é amolecido e deformado plasticamente, e a camada de óxido é rompida na interface da junta para formar uma ligação metalúrgica. Como pontos negativos do processo têm-se o furo central causado pela ferramenta, que além do aspecto estético concentra tensões, e a deformação em forma de “gancho” da interface entre as chapas, onde se tem união metalúrgica parcial e também concentra tensões.

Como variáveis do processo citam-se: velocidade de penetração, velocidade de rotação, temperatura de prévia, tempo de permanência e geometria da ferramenta. Normalmente o processo de penetração leva alguns segundos, mas o tempo total do processo fica fortemente dependente do tempo de permanência utilizado.

OLIVIECKI e BESKOW (2013) esclarecem que os principais parâmetros do processo FSW, que se assemelham com os parâmetros da soldagem FSSW. Os autores ainda explicam, mais especificamente, como funciona cada parâmetro.

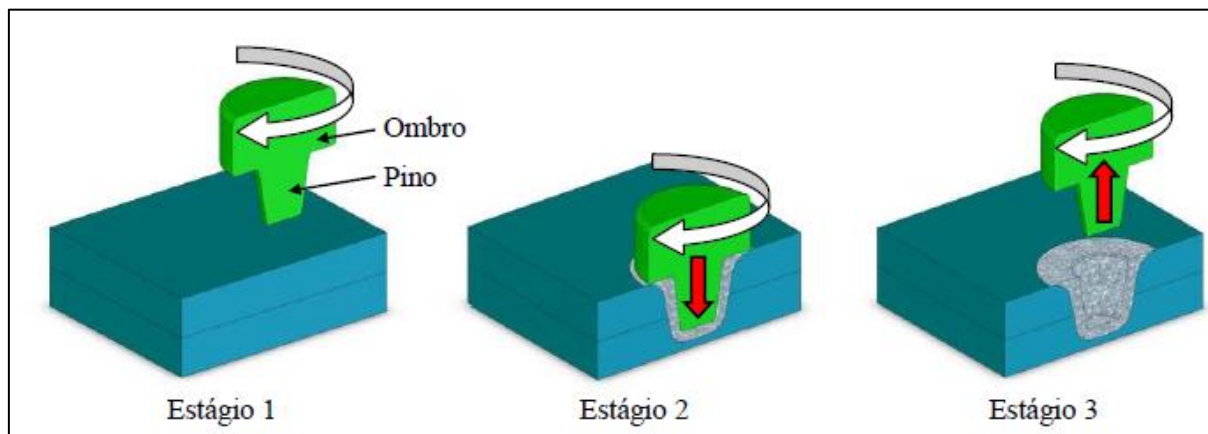
De acordo com OLIVIECKI e BESKOW (2013):

- **Velocidade de avanço:** distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo (mm/min). Tem relação direta com a geração de calor durante o processo;
- **Velocidade de rotação:** medida em rotações por minuto (rpm), diretamente ligada à geração de calor durante o processo de soldagem. Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a temperatura atingida durante o processo;
- **Ângulo de inclinação:** auxilia na movimentação do material da frente para trás do pino, e também, na consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo, devido à maior pressão existente nesta região;
- **Geometria da ferramenta:** responsável por promover o aquecimento e o escoamento do material plastificado ao redor do pino;
- **Penetração da ferramenta:** função do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado e define a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta.

Nos resultados experimentais de LIU *et al.* (2012) pode-se avaliar que a velocidade de rotação e o tempo de permanência foram os fatores dominantes que mais influenciaram na resistência ao cisalhamento por tração. A resistência das

amostras aumentou à medida que o tempo de permanência aumentou. ROSENDO (2009) explica as três etapas do processo, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Etapas do Processo FSSW



Fonte: ROSENDO (2009).

O processo inicia quando a ferramenta entra em rotação numa velocidade pré-estabelecida e é posicionada junto à superfície da chapa superior. A segunda etapa consiste na penetração da ferramenta nas chapas até o ombro alcançar uma profundidade determinada na chapa superior. Na última etapa a ferramenta retrocede à sua posição inicial, deixando um furo central no botão de solda. Entre a segunda e a terceira etapa, é possível manter a ferramenta em rotação na mesma posição por um período determinado, conhecido como *dwell time* ou tempo de permanência.

Conforme LATHABAI *et al.* (2006, *apud* AITA, 2017), o calor de fricção gerado pela rotação do pino mistura o material nas direções do eixo e da circunferência da ferramenta. A pressão desempenhada pelo ombro da ferramenta produz um anel na chapa superior e restringe o fluxo de material, evitando o desperdício na região da solda. No recuo da ferramenta, o pino deixa um furo no centro na solda.

PICCINI e SVOBODA (2017) observaram que as propriedades mecânicas ótimas são alcançadas quando o ombro da ferramenta de soldagem se aproxima da interface da junta. PICCINI e SVOBODA (2015) esclarecem que se processo de soldagem FSSW for aplicado adequadamente, é possível produzir juntas eficientes em baixas temperaturas. Juntas que não contêm defeitos, tem alta resistência ao cisalhamento e falham apenas por sobrecarga na seção da interface unida. Por outro lado, juntas mal soldadas podem falhar de maneira frágil na ponta da solda.

SEKHAR *et al.* (2018) expuseram que velocidades rotacionais mais altas da ferramenta, em torno de 2500 rpm, resultam em uma maior carga de falha de



cisalhamento de tração. A velocidade de rotação da ferramenta exerce um papel fundamental na resistência da junta.

Nas pesquisas recentes, o processo FSSW tem sido aplicado em diversas áreas, JAMILI-SHIRVAN *et al.* (2020) aplicou a soldagem em vidros metálicos maciços, onde a amostra que apresentou a maior força de ruptura por tração/cisalhamento teve as zonas de soldagem bem definidas e a ZTMA teve dureza menor que o MB.

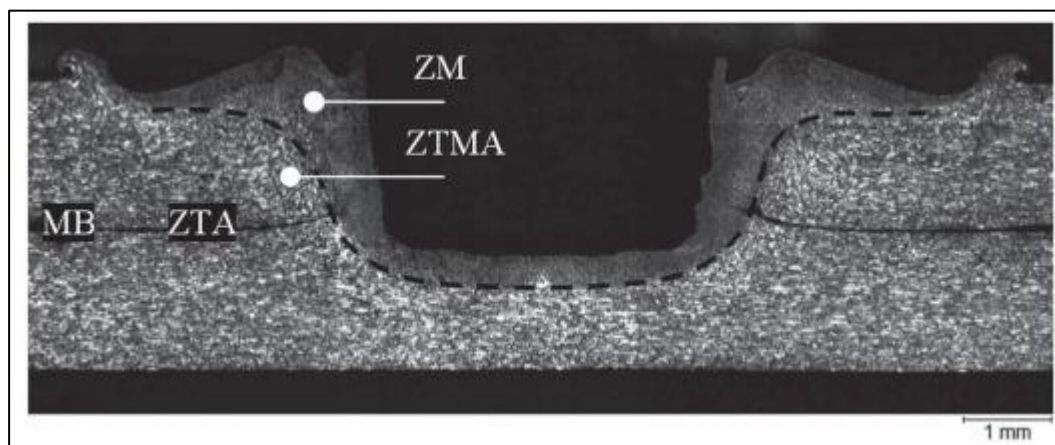
SUN *et al.* (2019) aplicaram a soldagem FSSW em chapas de aço, e esclareceram que, para aços, a velocidade de rotação da ferramenta é o parâmetro mais importante, enquanto a geometria da ferramenta e o tempo de permanência permanecem constantes. A união de aços por FSSW tem mostrado que as mudanças microestruturais que ocorrem durante o processo de soldagem afetam consideravelmente as propriedades mecânicas do material. SUN *et al.* (2019) utilizaram uma variação do FSSW, pois estavam com problemas nas soldagens temperaturas altas. Propuseram uma nova técnica de FSSW de baixa temperatura (LT-FSSW), com uma velocidade de rotação muito baixa, não superior a 50 rpm e as forças aplicadas nas ferramentas rotativas foram aumentadas. Os autores consideram uma técnica simples e que também pode ser usada para produzir juntas sólidas com uma estrutura de grãos ultrafinos em metais de alto ponto de fusão como o aço.

Como a soldagem FSSW tem vantagens para unir metais e materiais orgânicos devido à uma forte deformação plástica e um auto aquecimento adequado, XIE *et al.* (2020) propuseram a união de alumínio e madeira com camadas intermediárias de polímero termoplástico, e obtiveram resultados potenciais de alto desempenho mecânico. Os autores ainda explicam que o polímero teve a função de induzir a ligação química entre o alumínio e a madeira, amortecer o estresse residual e isolar a entrada de calor. A combinação desses materiais pode ser aplicada em móveis e construção civil.

### 2.2.1 Microestrutura no processo FSSW

As juntas soldadas pelo processo FSSW são compostas por três zonas principais. De acordo com ROSENDO (2009) são denominadas por zona de mistura (ZM), zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA). Além das zonas, observa-se também o metal base (MB). A Figura 5 mostra a macrografia de uma junta sobreposta produzida pelo processo FSSW destacando as zonas da solda.

Figura 5 – Macrografia da soldagem FSSW

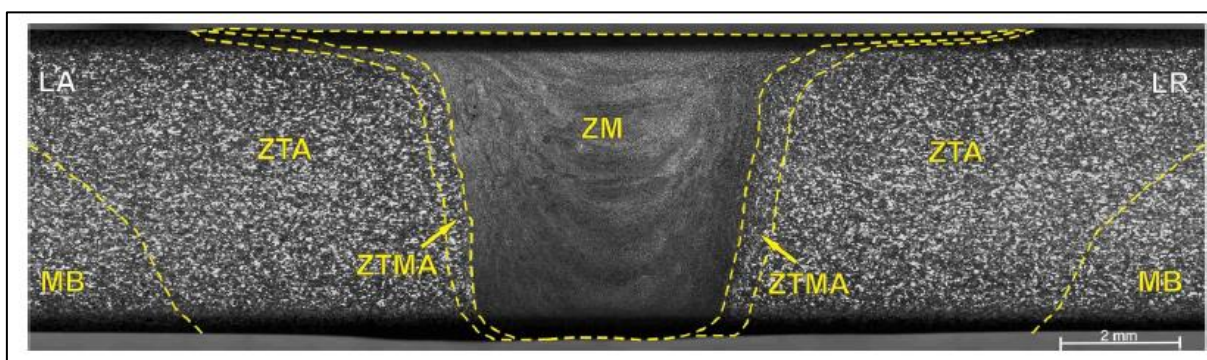


Fonte: CAMPANELLI *et al.* (2011, apud AITA, 2017).

Segundo MAZZAFERRO (2008) e ROSENDO (2009) cada zona tem características distintas de microestrutura que acabam gerando influência no desempenho mecânico das juntas soldadas. No local onde ocorre a solda, a ZM é caracterizada por excessiva deformação plástica e temperatura elevada, o que induz à recristalização do material, mistura entre as chapas e grãos muito finos. AITA (2017) esclarece que a microestrutura na ZM e na ZTA decorre dos efeitos do calor de fricção e da deformação plástica na soldagem. No MB acontece um acréscimo da temperatura contudo em intensidade insuficiente para ocasionar modificação na microestrutura. YANG *et al.* (2014) explica que os grãos da ZM são influenciados pelo formato da ferramenta.

PANDEY e MAHAPATRA (2019) indicam que a microdureza é mais alta na “região de mergulho” da ZM, isto ocorre pela alta compressão dos materiais que ocorre no centro da ZM. A Figura 6 expõe as zonas de solda com uma melhor visualização de cada ponto.

Figura 6 – Zonas de solda



Fonte: SOUZA *et al.* (2015)

Segundo MAZZAFERRO (2008), a ZTMA tem temperatura menor em relação à ZM e uma deformação plástica bem reduzida, causando assim, uma recuperação de material. A ZTMA ainda possui grãos alongados no sentido do fluxo de material. Já na ZTA não ocorre deformação dos grãos e a temperatura pode alcançar níveis que causem mudanças microestruturais. MAZZAFERRO (2008) ainda explica que o tamanho de cada zona depende dos parâmetros empregados e do material escolhido para a solda.

De acordo com SURYANARAYANAN e SRIDHAR (2020), o aumento do valor da dureza é observado na ZTMA devido à recristalização parcial, o que indica a formação de uma interface de ligação mais ampla. Por outro lado, na proximidade da ZTA a dureza tem valores reduzidos devido aos efeitos da aumento do ciclo térmico. Os autores ainda explicam que o furo central deixado pela solda FSSW é uma desvantagem do processo, pois nesse local é observado os fatores de concentração de tensões e onde inicia a corrosão.

### 2.2.2 Parâmetros de processo e resistência da junta

Os estudos de YANG *et al.* (2014) indicaram que a velocidade de rotação, o tempo de permanência e a profundidade de penetração foram os principais fatores de influência para a resistência à tração e ao cisalhamento. A resistência das juntas soldadas é ampliada com um tempo de permanência maior. BOZZI *et al.* (2010) explicam que existem três fatores microestruturais que desempenham um papel determinante na resistência da solda: o tamanho da solda, a localização da ZM e a inclinação da ponta da interface não soldada (gancho).

Com o aumento da velocidade de rotação, a resistência ao cisalhamento aumenta devido ao tamanho maior da ZM. Ao alterar a profundidade de penetração da ferramenta, a localização da zona de mistura pode ser controlada para maximizar a distância de ligação entre a ponta da interface (gancho) e o furo central deixado pelo pino da ferramenta.

O tempo permanência (*dwell time*) é um fator importante para a soldagem, influencia diretamente na resistência da junta. A dureza da junta soldada varia de acordo com o tempo de permanência e a elevação da temperatura. De acordo com GAOHUI *et al.* (2019) à medida que o tempo de permanência aumenta, o tamanho da ZM é acrescido e todos os parâmetros geométricos apresentaram acréscimo devido ao aquecimento e a uma mistura heterogênea. O formato do “gancho” também depende da variação escolhida para o tempo de permanência. Os autores ainda

esclarecem que quanto mais tempo de permanência, pode-se observar uma redução da dureza na maioria das regiões da junta, isso ocorre devido ao aumento da entrada de calor e da ampliação do grau de amolecimento das ligas.

### 2.2.3 Defeitos de soldagem

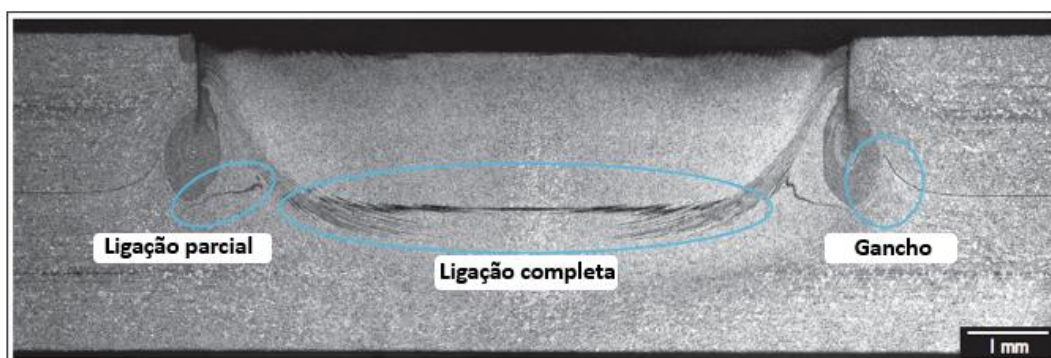
Durante a soldagem, segundo BADARINARAYAN *et al.* (2009, *apud* AITA, 2017) o filme de óxidos que fica na superfície das chapas, é quebrado e suas partículas são adicionadas à ZM. Esses fragmentos tem papel importante no nível de união das chapas, influenciando na ligação completa (*bonding ligament*) e na ligação parcial (*partial bonding*).

PARRA *et al.* (2011) explanam que a ligação parcial ocorre em um tipo de região de transição em que a ligação entre a chapa superior e a inferior não é tão forte, aparece como uma linha curta e geralmente irregular na seção transversal da junta. No entanto, a ligação completa acontece em uma região de boa adesão entre as chapas superior e inferior e tem resistência alta.

Além dessas divergências que podem ocorrer na ligação, o processo FSSW tem uma particularidade, a concepção de um defeito geométrico na interface das duas chapas soldadas, o “gancho” (*hook*). Esses defeitos podem ser analisados na Figura 7 abaixo. Segundo LI, ZHOU *et al.* (2019) a área de interação do gancho é caracterizada por uma combinação das regiões parcialmente aderente e não aderente, o que gera uma área sensível a trincas sob o carregamento de tração e cisalhamento.

ROSENDO (2011) explica que a geometria do gancho é estabelecida pela dimensão da força axial aplicada durante a penetração. A presença do gancho afeta a integridade do botão de solda, a região é a primeira suscetível a propagação de trincas quando é submetida a aplicação de uma carga externa.

Figura 7 – Defeitos da soldagem



Fonte: Adaptado de PARRA *et al.* (2011)

Esses defeitos que ocorrem no processo FSSW, de acordo com PARRA *et al.* (2011) estão associados ao fluxo de material, podem ser chamados de falta de mistura e recarga incompleta, ambos são localizados no caminho pelo qual a camisa mergulha na chapa superior. Sua ocorrência é associada à combinação inadequada da velocidade de rotação e do tempo de soldagem. PANDEY e MAHAPATRA (2019) explicam que a altura do defeito do gancho aumenta de acordo com a ampliação dos parâmetros de velocidade de rotação, tempo de permanência e profundidade de mergulho.

De acordo com BOZZI *et al.* (2010) tensões residuais trativas são medidas próximas à zona de mistura e aumentam conforme a velocidade de rotação, reduzindo a resistência à tração da junta, problema que é intensificado pelo efeito da concentração de tensões ao redor da ponta da interface.

#### 2.2.4 Força e temperatura no processo FSSW

A magnitude da força axial muda de acordo com a velocidade rotação. AITA (2017) explica que quanto maior a velocidade de rotação da ferramenta, os valores de força axial são menores, e ainda, quando acontece o contato do ombro na superfície de cima da junta, a força cresce de forma mais rápida. A força máxima ocorre no momento em que o ombro da ferramenta tangencia a superfície da chapa superior. Quando as forças axiais são maiores a ferramenta tem sua vida de trabalho reduzida.

Quanto a temperatura atingida durante o processo, esta tem influência importante no tamanho das zonas da solda e, conseqüentemente, nas propriedades finais da junta. Conforme AITA (2017), o ombro é o elemento da ferramenta de maior influência no acréscimo da temperatura. Segundo SINGH *et al.* (2020), nos processos FSW e seus derivados, a geração de calor ocorre principalmente por três fatores, deformação plástica, dissipação viscosa, e geração de calor por atrito na interface ferramenta/chapas. Segundo KLOBČAR *et al.* (2015), se a soldagem for feita com maior aporte de calor, a interface entre as chapas fica mais ondulada, comprometendo a resistência da junta.

No estudo de ZHOU *et al.* (2019), onde foram soldadas chapas de alumínio 1060 e cobre T2 pelo processo FSSW, a análise da temperatura mostrou que uma velocidade de rotação alta leva à uma temperatura de pico mais alta, porém a um torque e força de mergulho mais baixos devido ao maior amolecimento dos materiais.

### 2.3 Liga de Alumínio 6063-T5

As ligas de alumínio apresentam boa formabilidade, resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica, o que resulta em um grande potencial para aplicação nas indústrias. SINGH *et al.* (2020) explicam que o alumínio tem algumas propriedades importantes, como baixa viscosidade fundida, alta refletividade, formação de camada de óxido inerente que leva a trincas à quente. Os autores também explicam que, usar ligas de alumínio e magnésio, pode oferecer redução de peso potencial em comparação com ferro fundido e aço em muitas estruturas.

De acordo com FIGUEIREDO e SANTO (2017), nas normas brasileiras, as ligas são classificadas segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a norma NBR ISO 209:2010. Na nomenclatura das ligas, o segundo e o terceiro dígitos são arbitrários para identificar a liga na série e o último dígito caracteriza o tipo de processo utilizado. As ligas podem ainda passar por tratamentos, sendo esses classificados com a letra “T”, onde cada número está associado a diferentes tipos de tratamentos. A nomenclatura T5, por exemplo, indica que a liga foi resfriada a partir de uma temperatura elevada e envelhecida naturalmente.

A definição das ligas fundidas, segundo a IASD (*International Alloy Designation System*), Sistema Internacional de designação de ligas, está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das Ligas de Alumínio

Série	Liga
1xxx	pureza > 99,00% Al
2xxx	Al – Cu
3xxx	Al – Mn
4xxx	Al – Si
5xxx	Al – Mg
6xxx	Al – Mg – Si
7xxx	Al – Zn
8xxx	Outros elementos

Fonte: IASD (International Alloy Designation System)

ROSENDO (2009) esclarece que as ligas mais utilizadas para o segmento industrial e automotivo são 5xxx e 6xxx, pois quando essas ligas são tratadas termicamente, apresentam excelentes resultados práticos e boa qualidade superficial depois de passarem pelo processo de conformação. Segundo AITA (2017), a série 6xxx das ligas de alumínio, tem como principais elementos químicos em sua composição o magnésio e o silício. A presença desses elementos, em quantidades

apropriadas, faz com que o tratamento térmico seja favorável e tenha bom desempenho. Apesar dessas características das ligas 6xxx serem pontuais, foi escolhido esse tipo de liga de alumínio por ter baixo custo de mercado e o setor automotivo utiliza em larga escala.

De acordo com NASCIMENTO (2015) as principais características da liga 6063 são alta resistência à corrosão, boa ductilidade e conformabilidade. A liga também é apropriada para anodização decorativa fosca.

A indústria IRMAOS GALEAZI LTDA, de Porto Alegre-RS, forneceu para este trabalho as amostras de alumínio 6063 T5, com limite de resistência de 150 MPa, limite de escoamento de 10 MPa e alongamento de 8%.

## **2.4 Análise de Variância (ANOVA)**

A estatística sempre esteve presente em trabalhos científicos, segundo OLIVEIRA (2013), essas ferramentas estatísticas são utilizadas para validar e conceder confiabilidade as propostas de estudo. A aplicação da análise de variância (ANOVA) surge como um instrumento ideal para experimentos onde a ideia é testar se existe diferença entre as médias dos tratamentos e avaliar as hipóteses.

De acordo com RIBOLDI (1995), a ANOVA é uma metodologia empregada para examinar as diferenças entre dois ou mais tratamentos, uma ferramenta estatística que serve para decompor a variância total ou soma de quadrados de desvios totais nas diversas causas de variação.

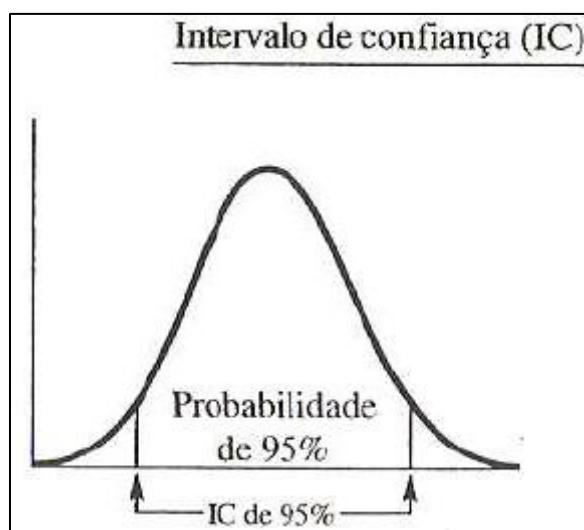
A opção pelo processo apropriado para comparar médias determina que deve-se considerar o nível de significância e o poder do teste. OLIVEIRA (2008) explica que “o nível de significância de um teste é a probabilidade de rejeitar a hipótese de que as médias são iguais, quando esta hipótese é, na realidade, verdadeira. Já o poder do teste é a probabilidade de rejeitar a hipótese de que as médias são iguais quando esta hipótese é, na realidade, falsa.”

A análise de variância, segundo OLIVEIRA (2013), se apresenta como uma ferramenta estatística que oferece suporte na comparação entre três ou mais grupos. É eficiente como teste estatístico que mantém o erro em um nível constante e controlado, concedendo uma única tomada de decisão. A diferença significativa entre três, seis ou  $n$  médias amostrais pode ser estimada admissível em um nível de 5% de significância. A ANOVA produz uma razão  $F$ , onde o numerador mostra a variação entre os grupos comparados e o denominador guarda uma estimativa de variação dentro desses grupos. Essa razão indica o tamanho da diferença entre os grupos pelo



tamanho da variação dentro de cada grupo. O autor ainda explica que é possível medir se o valor da razão  $F$  está no nível de significância de 0,05 e 0,01 como valores ótimos, pois indicam valores entre 95% e 99% da possibilidade esperada, que dependendo da pesquisa indica o intervalo de confiança desejado e pode ser visto graficamente na Figura 8.

Figura 8 – Intervalo de Confiança da ANOVA



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2013)

A análise de variância pode ser de um fator, dois fatores ou “n” fatores, de acordo com ESPIRITO-SANTO e DANIEL (2018), a ANOVA de um fator versa sobre a comparação do efeito fixo do fator sobre uma variável dependente  $Y$ . A variável independente  $X$  que pode assumir vários níveis. Os níveis retratam diferentes grupos ou categorias. A variância entre grupos é a soma dos quadrados das diferenças entre as médias dos grupos e a média global. Média global é a média de todos os dados considerando a amostra como um todo.

Neste trabalho, foi utilizado a ANOVA com dois fatores (Velocidade de Rotação e Tempo de Permanência, ESPIRITO-SANTO e DANIEL (2018) explicam que esse tipo mostra que existem duas ou mais variáveis independentes e entre grupos significa que os sujeitos em cada grupo são diferentes. É possível avaliar o efeito principal para cada variável independente e averiguar ainda se existe um efeito de interação. Se o efeito de uma variável independente sobre a variável dependente ocorrer do nível de uma segunda variável independente, logo tem-se efeito de interação.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi o procedimento experimental, GIL (2008) esclarece que determinam-se as variáveis que podem influenciar, definem-se as configurações de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Foram fabricados corpos de prova na forma de juntas sobrepostas de liga de alumínio 6063-T5, soldados pelo método FSSW. Foram realizados ensaios mecânicos (microdureza e cisalhamento) e metalografia. Durante as soldagens foram monitoradas temperatura e força axial para acompanhamento do processo e garantia de repetibilidade. O método quantitativo foi empregado neste trabalho, conforme FONTELLES *et al.* (2009), constitui uma operação com variáveis expressas sob a forma de dados numéricos e coloca recursos e técnicas estatísticas para classificar e analisar, como por exemplo porcentagem, média e desvio padrão.

#### 3.1 Questionamentos da Pesquisa

A questão principal deste trabalho consiste em:

Q1 – Quais os parâmetros ideais para um bom desempenho mecânico na soldagem FSSW em liga de alumínio AA6063-T5?

Com isso, pode-se ainda encontrar respostas para outros questionamentos importantes, tais como:

Q2 – Qual a resistência ao cisalhamento da junta?

Q3 – Qual o perfil da microdureza da junta soldada?

Q4 – O que ocorre com a estrutura do alumínio após o processo?

Q5 – Qual a correlação entre o comportamento mecânico das juntas e os parâmetros de soldagem?

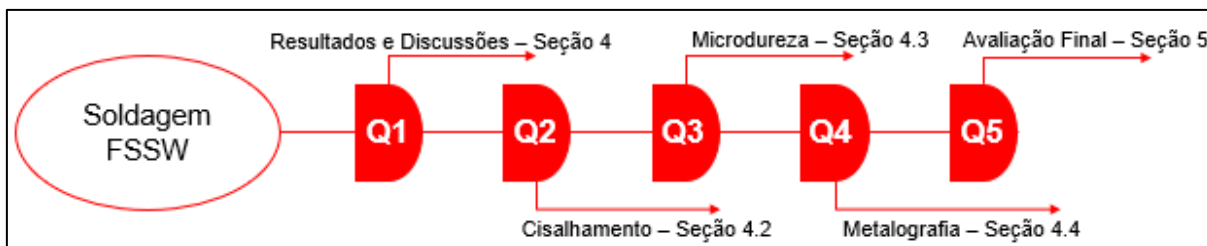
#### 3.2 Delineamento da Pesquisa

O tema deste estudo foi estabelecido com a finalidade de analisar o comportamento mecânico de solda FSSW na liga de alumínio 6063-T5 buscando determinar o efeito dos parâmetros de soldagem na resistência ao cisalhamento e nas dimensões das zonas da solda. Por ser uma tecnologia pouco poluente, o FSSW desponta como um processo de grande potencial para substituir, em algumas situações, as técnicas de união por ponto convencionais. Os questionamentos estabelecidos inicialmente foram confrontados com os resultados de testes

experimentais de caracterização mecânica e metalúrgica das soldas, buscando a resposta para todos ele.

Um mapa conceitual é utilizado para explicar o delineamento da pesquisa, como mostra a Figura 9, onde Q1, Q2, Q3 e Q4 e Q5 são os questionamentos da pesquisa.

Figura 9 - Mapa conceitual do delineamento da pesquisa



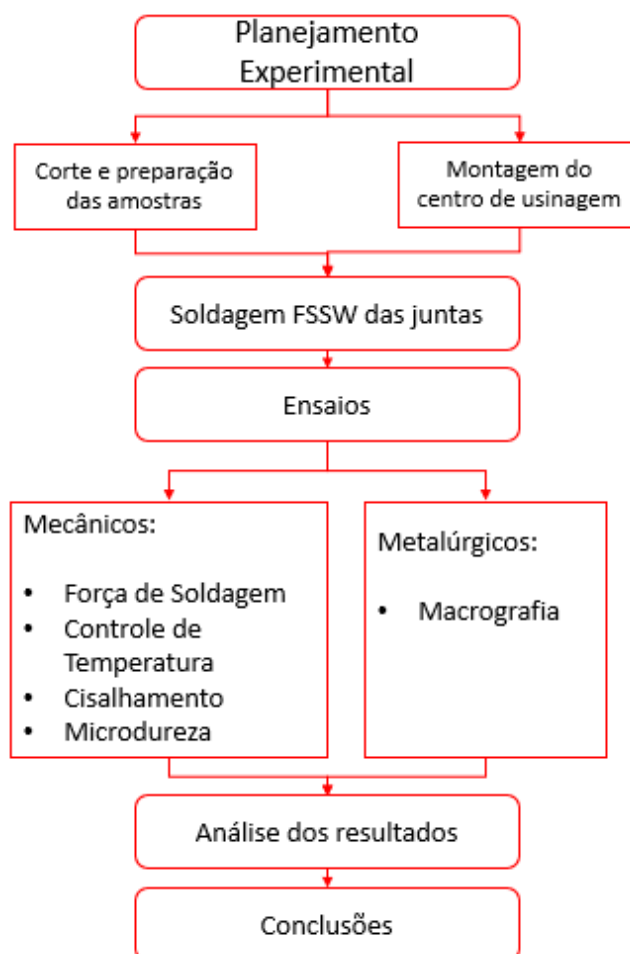
Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 Forma de coleta de dados

Como ferramentas de coleta das informações, foram revisados artigos, dissertações, teses e livros nos temas de ligas de alumínio, soldagem em geral, soldagem sólida e soldagem FSSW em ligas de alumínio. A partir da revisão e da experiência prévia no tema, foram determinadas as janelas de variação para os parâmetros de processo em estudo: velocidade de rotação e tempo de permanência. Corpos de prova na forma de juntas sobrepostas foram produzidos com o processo de soldagem FSSW em chapas de alumínio AA6063-T5. Durante as soldagens foi feito o monitoramento da força axial e da temperatura em dois pontos na região do botão de solda. Posteriormente, as amostras foram submetidas a ensaio de resistência ao cisalhamento, preparação metalográfica para análises da macrografia da junta soldada e medição do perfil de microdureza e investigação dos modos de falha no ensaio mecânico.

Um fluxograma do trabalho é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de atividades

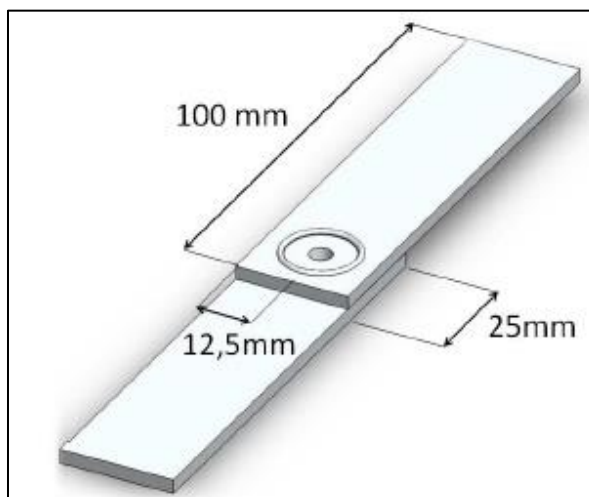


Fonte: Próprio autor

### 3.3.1 Corpos de prova

Para este trabalho foram utilizadas chapas de alumínio AA6063-T5 de 100 mm de comprimento, 3,2 mm de espessura e 25 mm de largura para a preparação de corpos de prova na forma de juntas sobrepostas. Os corpos de prova para ensaio de cisalhamento, seguiram o mesmo padrão adotado por AITA (2017), ou seja, foram baseados na norma ISO14273:2002 “*Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds*” como exposto na Figura 11. A sobreposição foi de 25 mm e o furo central resultante da soldagem ficou no centro da sobreposição.

Figura 11 – Modelo dos corpos de prova



Fonte: AITA (2017)

As chapas foram cortadas no comprimento de 100 mm utilizando uma cortadora metalográfica da marca Teclago CM 60 no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos da UNIPAMPA como mostrado na Figura 12. O material das chapas consiste na liga de alumínio 6063-T5, cuja composição química está mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química da liga AA6063-T5

Composição Química (%)							
Cu	Fe	Mg	Si	Ti	Zn	Cr	Al
0,1	0,35	0,55	0,3	0,1	0,05	0,1	98,45

Fonte: Certificado de Qualidade Irmãos Galeazi Ltda.

Figura 12 – Cortadora metalográfica



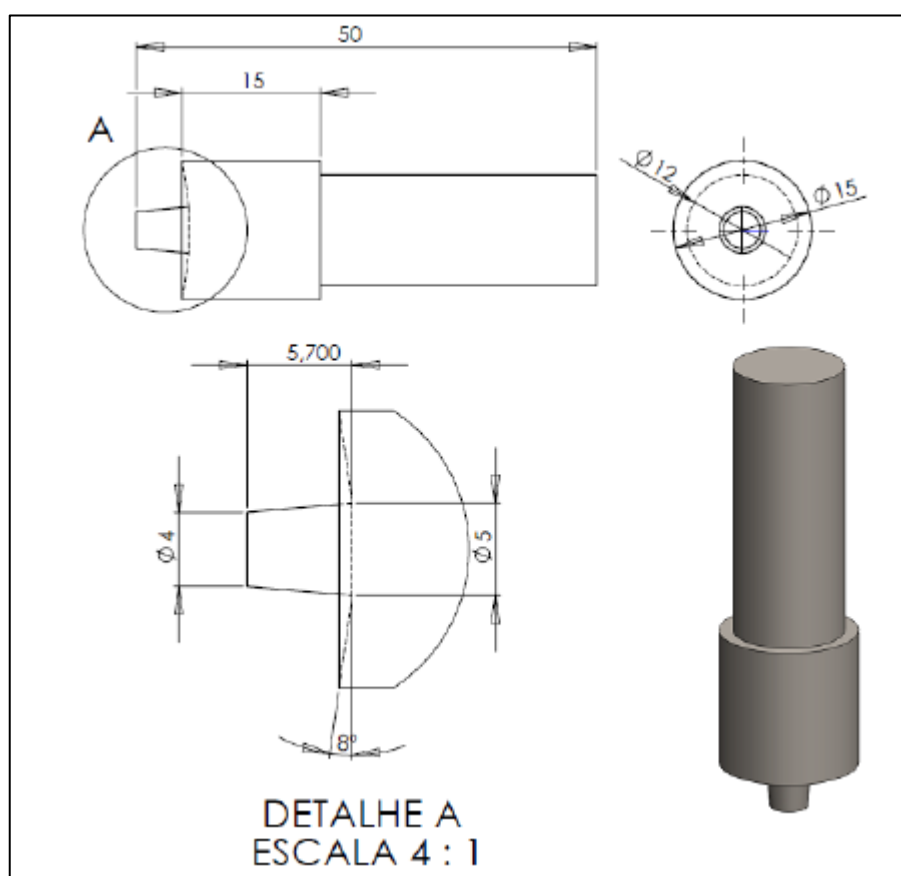
Fonte: Próprio autor

Depois de cortadas, as chapas foram encaminhadas para limpeza por banho de imersão em acetona dentro de um Becker, em um equipamento de ultrassom, à temperatura ambiente, por 20 minutos.

### 3.3.2 Ferramenta de soldagem

Para realizar o processo de soldagem, foi utilizada a ferramenta projetada por AITA (2017), que foi elaborada em aço M2 e temperada em óleo, depois foi submetida a dois revenimentos (2,5h em temperatura de 550 °C) chegando em uma dureza aproximada de 65 HRC, seu dimensionamento está exposto na Figura 13.

Figura 13 – Ferramenta de soldagem



Fonte: Adaptado de AITA (2017)

### 3.3.3 Setup de soldagem

Posteriormente, as chapas foram utilizadas para produzir corpos de prova na forma de juntas sobrepostas (ver Figura 11) usando o processo FSSW. As soldagens foram realizadas com centro de usinagem CNC ROMI® D800, como mostrado na Figura 14. Para garantir reprodutibilidade, foi utilizado um gabarito desenvolvido por AITA (2017).

Figura 14 – Centro de usinagem CNC



Fonte: Próprio autor

Para monitorar os ciclos de força axial e de temperatura durante o processo de soldagem, foi utilizado um condicionador de sinais modelo *Spider 8* da HBM. O intuito dessas medições é certificar-se da repetibilidade dos ensaios, bem como ter uma informação da temperatura durante o processo. Flutuações anormais da carga axial podem sugerir instabilidade na adesão ferramenta/chapas e é uma informação importante também. Detalhe do setup de soldagem está mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Equipamento de soldagem no centro de usinagem CNC: (a) gabarito de soldagem e (b) setup utilizado nas soldagens.



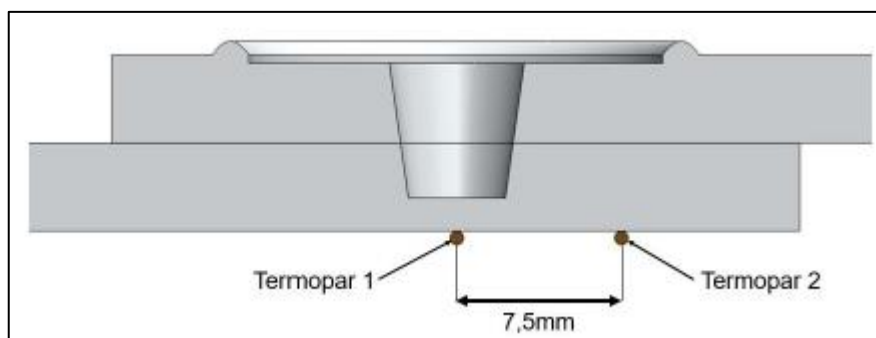
(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor

Para medir a temperatura, foram utilizados dois termopares tipo J posicionados na parte inferior da chapa inferior. Ambos os termopares estavam separados por 7,5 mm de distância, sendo um deles alinhado exatamente ao centro do botão de solda como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Disposição dos termopares



Fonte: AITA (2017)

A força axial foi medida utilizando uma célula de carga de 100 kN e um dispositivo para conectar o gabarito de soldagem à célula de carga. Os dados foram obtidos pelo condicionador *Spider 8* conectado a um notebook, utilizando o software *CatMan*, usando uma taxa de aquisição de 50 kHz. A Figura 17 mostra, em detalhe, o gabarito de soldagem, onde se vê o cabeamento dos termopares e o dispositivo de conexão do gabarito com a célula de carga.

Figura 17 – Detalhe mostrando o gabarito de soldagem, chapas, célula de carga e cabeamento dos termopares



Fonte: Próprio Autor

### 3.3.4 Parâmetros de soldagem

A partir de experiência prévia com liga de alumínio da série 6000, foram definidas a Velocidade de Rotação (S) e o Tempo de Permanência (T) como variáveis de investigação. A Velocidade de Penetração da ferramenta (VP) foi mantida constante em 200 mm/min em todas as soldagens. Para cada variável foram definidos três níveis de variação e, adotando o método fatorial completo para as combinações, foi obtido um total de nove combinações de soldagem, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Combinações de soldagem

Velocidade de Rotação [rpm]	Tempo de permanência [s]	Código	Sequência de combinações
1000	0	S1000_T0	1
	2	S1000_T2	2
	4	S1000_T4	3
2000	0	S2000_T0	4
	2	S2000_T2	5
	4	S2000_T4	6
3000	0	S3000_T0	7
	2	S3000_T2	8
	4	S3000_T4	9

Fonte: Próprio Autor

Para cada combinação de parâmetros foram produzidos 6 corpos de prova (CP) na forma de juntas sobrepostas (ver Figura 11). Do total, 5 CPs foram destinados para ensaio de cisalhamento e 1 para análise metalográfica e medição do perfil de microdureza, totalizando, assim, 54 corpos de prova (amostras).

### 3.4 Forma de tratamento dos dados

Os artigos e a teses citados nas referências bibliográficas tiveram uma análise com foco no estado da arte, ou seja, no que há de melhor dentro da área de tecnologia de materiais, no que diz respeito a soldagem no estado sólido. Sendo cada parte indispensável para a estruturação deste estudo e essenciais no desenvolvimento desse trabalho.

A partir da etapa da soldagem no centro de usinagem CNC, o próximo passo foi tratar os dados obtidos no processo, fazendo uma caracterização mecânica e uma



caracterização metalúrgica a fim de detalhar o desempenho mecânico das juntas soldadas.

### 3.4.1 Ensaios Mecânicos

A caracterização mecânica dos corpos de prova foi feita a partir do ensaio de cisalhamento e das medidas de microdureza. O ensaio de cisalhamento teve por finalidade avaliar o nível de resistência obtido com cada combinação de soldagem. Já o perfil de microdureza foi medido para obter uma indicação quantitativa das zonas da solda, de forma complementar às análises metalográficas.

O ensaio de cisalhamento foi realizado no laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos da UNIPAMPA com um equipamento universal de ensaios da marca *Shimadzu* AGS-X, utilizando uma célula de carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Para garantir um esforço puramente cisalhante nos botões de solda, foram colocados calços nas extremidades das amostras. A Figura 18 mostra uma vista geral da máquina de ensaios e um detalhe com uma amostra durante o ensaio de cisalhamento.

Figura 18 – Ensaio de Cisalhamento: (a) máquina universal de ensaios *Shimadzu* AGS-X e (b) detalhe de um corpo de prova durante ensaio de cisalhamento.



(a)

Fonte: Próprio Autor



(b)

O perfil de microdureza foi medido com um microdurômetro da marca *Buehler*, modelo Micromet 6010 como mostra a Figura 19. Foi utilizada uma carga de 1,0kg com indentador Vickers para as medições.

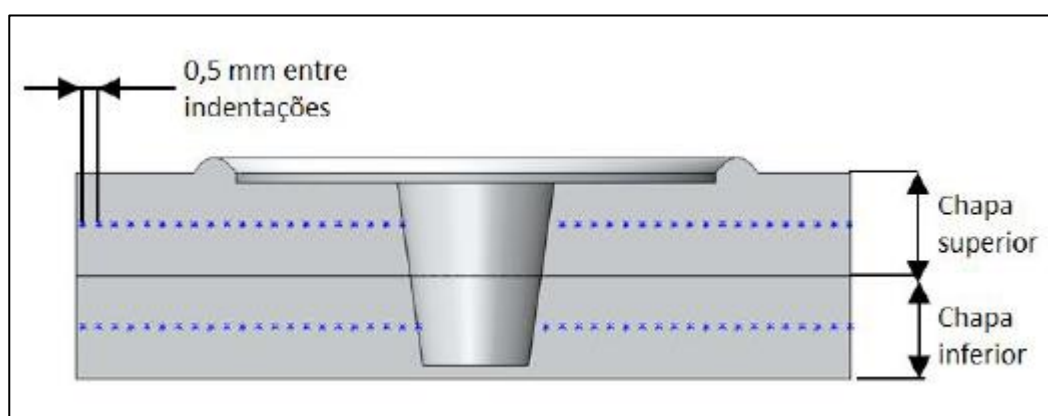
Figura 19 – Microdurômetro *Buehler*, modelo *Micromet 6010*



Fonte: Próprio Autor.

As indentações foram feitas com espaçamento de 0,5 mm entre as medições e o tempo de aplicação de carga foi de 10 segundos. Os perfis de microdureza foram medidos à meia espessura das chapas superior e inferior, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Seção transversal da solda com os pontos de medição de microdureza



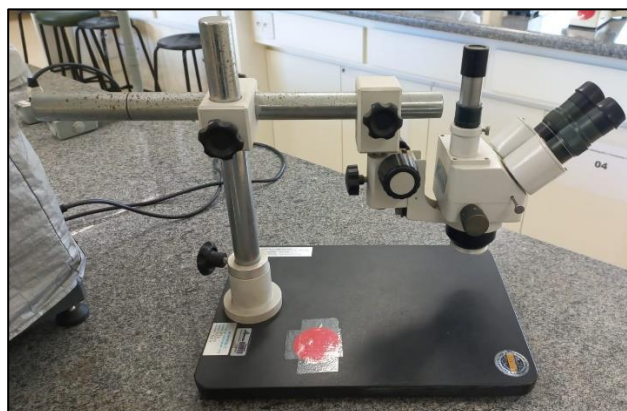
Fonte: Adaptado de AITA (2017)

### 3.4.2 Análise Metalográfica

Para analisar a macro e micrografia das juntas soldadas, um corpo de prova de cada combinação de soldagem foi separado e cortado próximo ao meio do botão de solda utilizando um disco abrasivo diamantado de corte de precisão no equipamento *Buehler IsoMet 4000*.

Devido à perda de material nas etapas de lixamento e polimento, os cortes foram realizados a 0,5 mm do centro do botão de solda. Após o corte, as amostras seguiram a sequência padrão de análise metalográfica, começando pelo embutimento, posteriormente o lixamento com lixas de granulometria: 120, 220, 400, 600, 800, 1200, 2000 e 2500 grãos/pol<sup>2</sup> e, finalmente, polimento em alumina em suspensão. Após esse processo, foi feito ataque químico com reagente com a seguinte composição: 100mL de HCl, 100mL de HNO<sub>3</sub>, 25mL de HF e 100mL de H<sub>2</sub>O. Essa composição é útil para destacar os aspectos geométricos da solda, como a interface entre as chapas, por exemplo além de realçar as zonas da solda. Para visualização da microestrutura foi utilizado o microscópio óptico da marca *Kontrol*, modelo IM713. Para as análises macrográficas foi utilizado um estereoscópio da marca *Kontrol* modelo XTL Figura 21.

Figura 21 – Estereoscópio *Kontrol* modelo XTL.



Fonte: Próprio autor

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das caracterizações das juntas soldadas através dos ensaios mecânicos de cisalhamento e perfil de microdureza, e dos ensaios metalográficos de macrografia da seção transversal da solda como descrito no Capítulo 3. Na medida em que os resultados são apresentados, também é feita a análise e discussão sobre os mesmos.

### 4.1 Aspecto visual da solda

A Figura 22 mostra fotos de corpos de prova tal como soldados pelo processo FSSW. Nota-se a marca deixada pela ferramenta de soldagem. Ao centro do botão observa-se o furo decorrente da penetração do pino. A circunferência maior corresponde à marca deixada pelo ombro da ferramenta. Nota-se, também uma protuberância de formato anular no entorno do botão de solda, que consiste em rebarba decorrente do material “expulso” radialmente para fora do centro da solda. No processo FSSW, a face do ombro normalmente é feita com uma pequena concavidade que tem por finalidade reter o fluxo de material e minimizar a rebarba.

A observação do aspecto do botão de solda fornece um bom indicativo da qualidade da solda. Em soldas com pouco aporte térmico ou pouca penetração resultam em uma rebarba de aspecto irregular. Já soldas bem realizadas (como as da Figura 22) apresentam uma rebarba contínua e bem destacada.

Figura 22 – Vista superior de corpos de prova soldados pelo processo FSSW



Fonte: Próprio Autor.

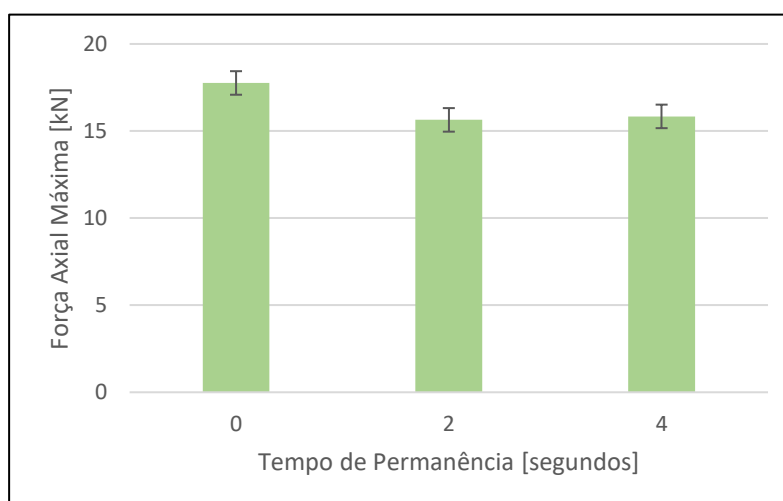
## 4.1 Força e Temperatura

O perfil da força axial durante a soldagem fornece uma indicação do nível de adesão ferramenta/chapas e também serve como referência para validar a repetibilidade operacional do processo entre soldas de mesma combinação de parâmetros. A força axial surge no momento em que o pino toca a chapa superior e aumenta gradualmente na medida em que a ferramenta mergulha em direção às chapas. Na sequência, o ombro toca a superfície da chapa superior causando um aumento significativo da força axial (pois o ombro tem uma área maior que o pino). A força aumenta de forma acentuada até que a ferramenta atinja a profundidade de penetração determinada. Ao atingir a profundidade máxima, a ferramenta pode ser retraída ou permanecer posicionada por alguns segundos (neste trabalho 2 ou 4s) o que é chamado de tempo de permanência. Durante o tempo de permanência a força axial cai gradualmente pois o aumento de temperatura causa o amolecimento do material. No fim do tempo de permanência a ferramenta é retirada de forma rápida e a força axial é zerada.

A análise do ciclo de temperatura no processo de soldagem leva a uma melhor compreensão das características microestruturais e propriedades mecânicas da junta soldada. As medições de temperatura foram realizadas com dois termopares posicionados na parte inferior do local de sobreposição das chapas, sendo o Termopar 1 posicionado sob o pino e o Termopar 2 sob o ombro da ferramenta.

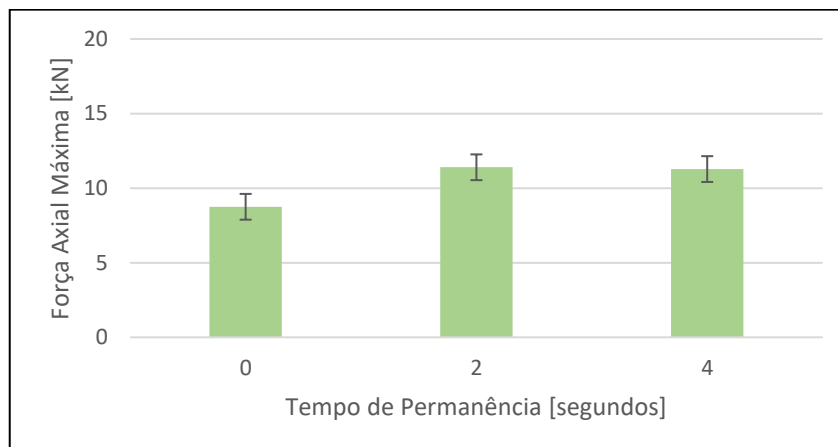
A média da força axial máxima obtida em cada rotação durante as soldagens são apresentados nas Figuras 23 a 25.

Figura 23 – Força axial máxima em S1000



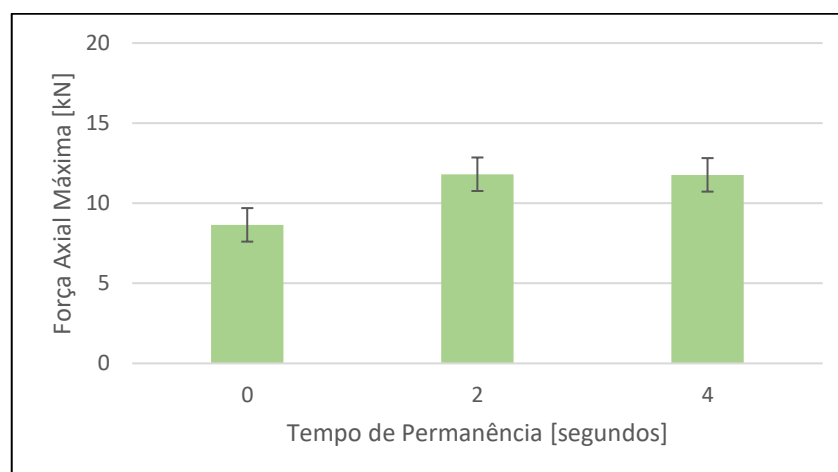
Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Força axial máxima em S2000



Fonte: Próprio Autor

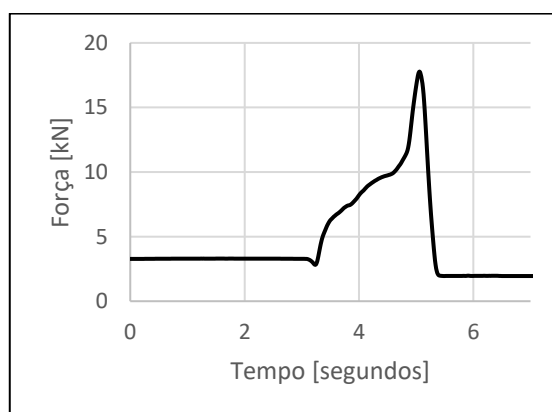
Figura 25 – Força axial máxima em S3000



Fonte: Próprio Autor

Foram elaborados os perfis de força axial para todas as combinações de soldagem, a Figura 26 mostra o perfil para a sequência S1000\_T0, os perfis das sequências de soldagem foram expostos no Anexo I.

Figura 26 - Perfil de Força Axial para S1000\_T0



Fonte: Próprio Autor.



É notório que a variação da rotação a partir de 2000 rpm não tem efeito sobre o valor da força axial máxima. Já para a rotação de 1000 rpm a força axial máxima mostrou-se maior o que indica um aporte térmico inferior ao das soldas feitas com rotações mais elevadas. Na soldagem de 1000 rpm a ausência de TP resultou em uma carga axial maior que aquelas com TP de 2 e 4s, o que está em linha com o relatado na literatura. Este comportamento tem a ver com o aporte de temperatura, que é maior quando se usa tempo de permanência. Contudo, nas soldagens feitas com 2000 e 3000 rpm, o comportamento foi praticamente idêntico, e a carga axial máxima aumentou nas soldas feitas com TP de 2 e 4s em comparação a amostra sem TP. Este comportamento diverge do esperado, do ponto de vista de aporte térmico. A Tabela 4 apresenta a média da força axial máxima medida em cada combinação de soldagem, juntamente do respectivo desvio padrão.

Tabela 4 – Resultados da força axial de soldagem

Combinação de soldagem	Velocidade de Rotação [rpm]	Tempo de permanência [s]	Média da força axial máxima [kN]	Desvio Padrão [N]
S1000_T0		0	17,7	311,1
S1000_T2	1000	2	15,6	228,6
S1000_T4		4	15,8	208,3
S2000_T0		0	8,7	300,8
S2000_T2	2000	2	11,4	180,1
S2000_T4		4	11,2	137,8
S3000_T0		0	8,6	136,8
S3000_T2	3000	2	11,8	142,2
S3000_T4		4	11,7	155,58

Foi feita uma análise de variância (ANOVA) para avaliar a significância de cada parâmetro de soldagem na força axial. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.

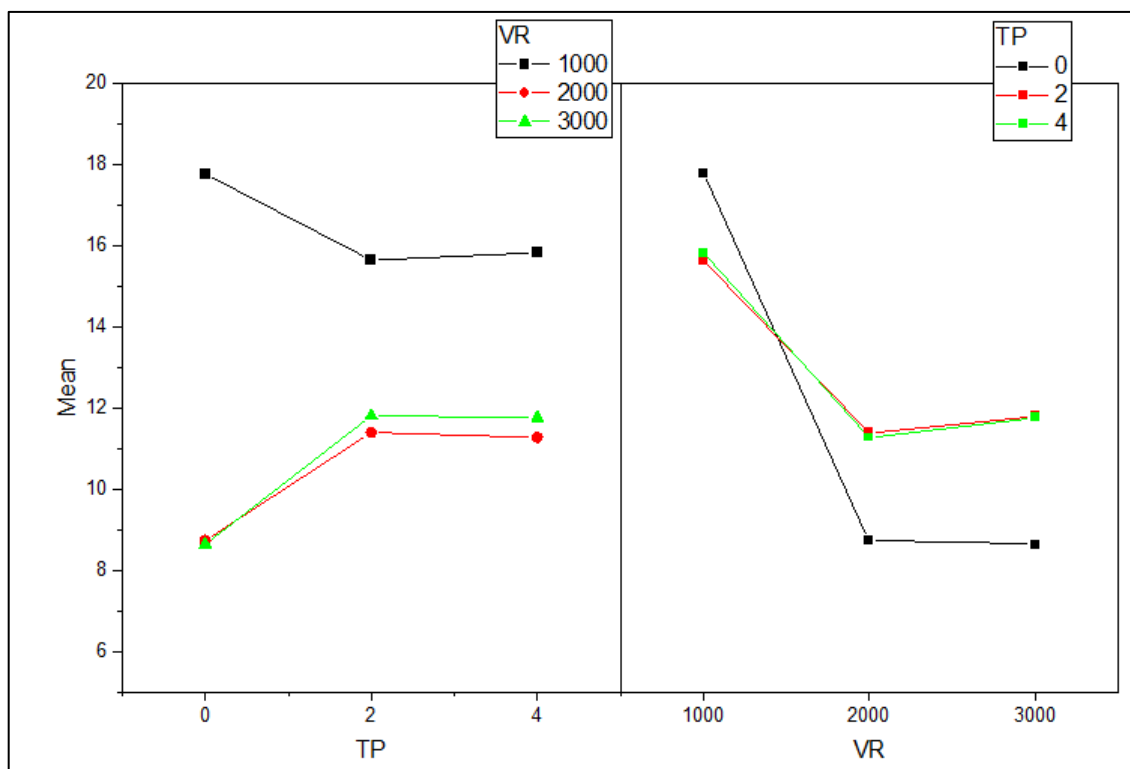
Tabela 5 – ANOVA da Força Axial

	GL	Soma Quadrática	Contribuição	Média Quadrática	F Valor	P Valor
<b>VR</b>	2	404,6	82,6%	202,3	4674,1	6,4E-53
<b>TP</b>	2	18,3	3,7%	9,1	211,9	1,2E-23
<b>Interações</b>	4	64,6	13,3%	16,1	373,6	6,9E-34
<b>Modelo</b>	8	487,6		60,9	1408,3	2,3E-51
<b>Erro</b>	45	1,9	0,4%	0,04		
<b>Total</b>	53	489,5	100%			

Fonte: Próprio Autor.

A ANOVA para a força axial foi feita com 95% de confiança e evidenciou que os parâmetros VR e TP são significantes para o nível 0,05 e a interação entre esses dois também tem significância. O valor obtido na velocidade de rotação teve maior influência na força axial, em torno de 82%. A Figura 27 mostra a interação dos parâmetros.

Figura 27 - Interação dos Parâmetros VR e TP na Força Axial



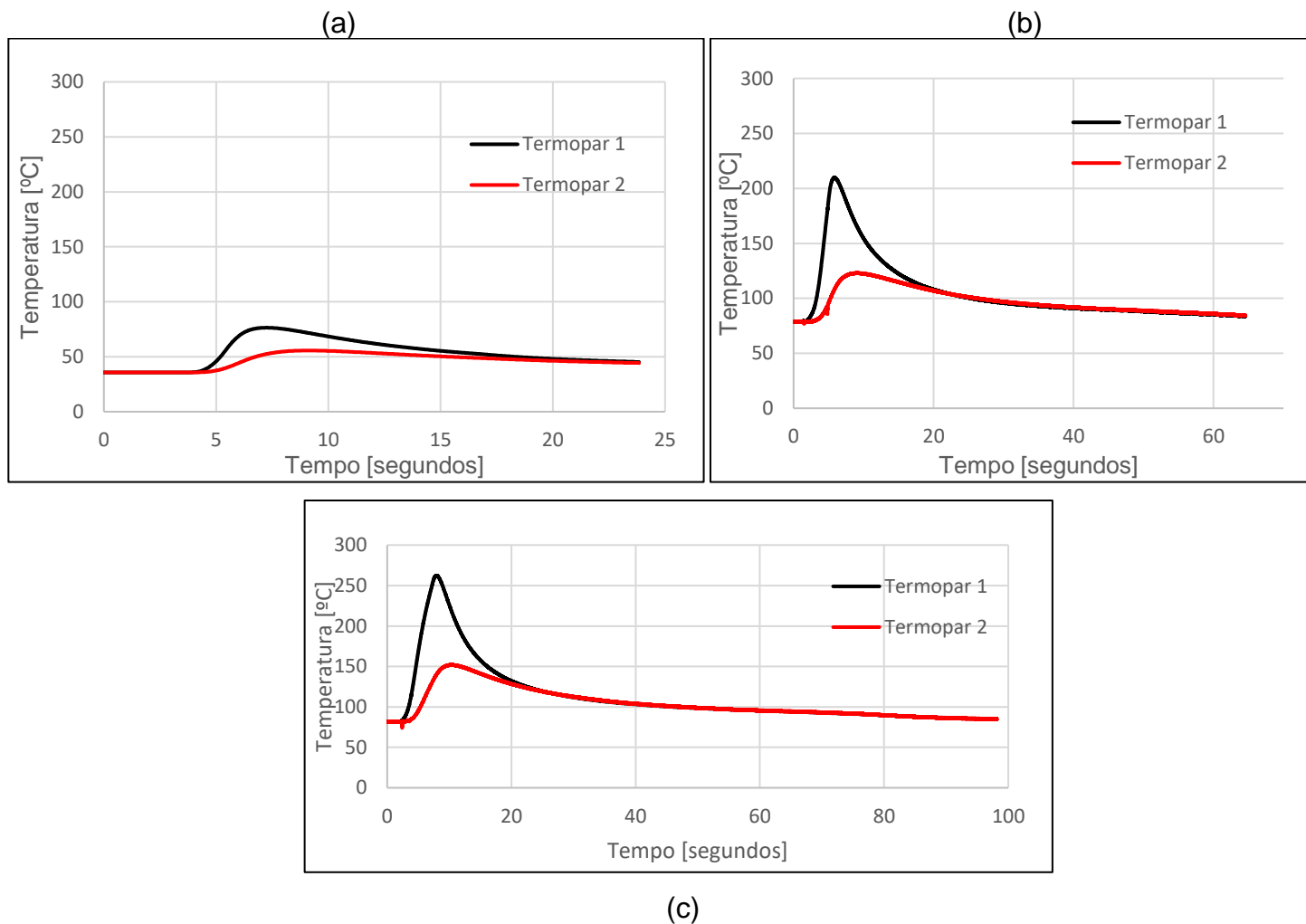
Fonte: Próprio Autor.

Quanto ao perfil de temperatura durante o processo, este também serve como referência para a repetibilidade do processo e como indicador da condição de adesão entre ferramenta/material. As medições de temperatura foram feitas com dois termopares do tipo J, posicionados na parte inferior da chapa inferior dos corpos de prova (ver Figura 15 (b)). O Termopar 1 foi posicionado sob o pino (no centro do botão) e o Termopar 2 sob o ombro, a 7,5 mm do primeiro.

As Figuras 28 a 30 mostram os perfis de temperatura medidos para uma amostra de cada combinação de soldagem.

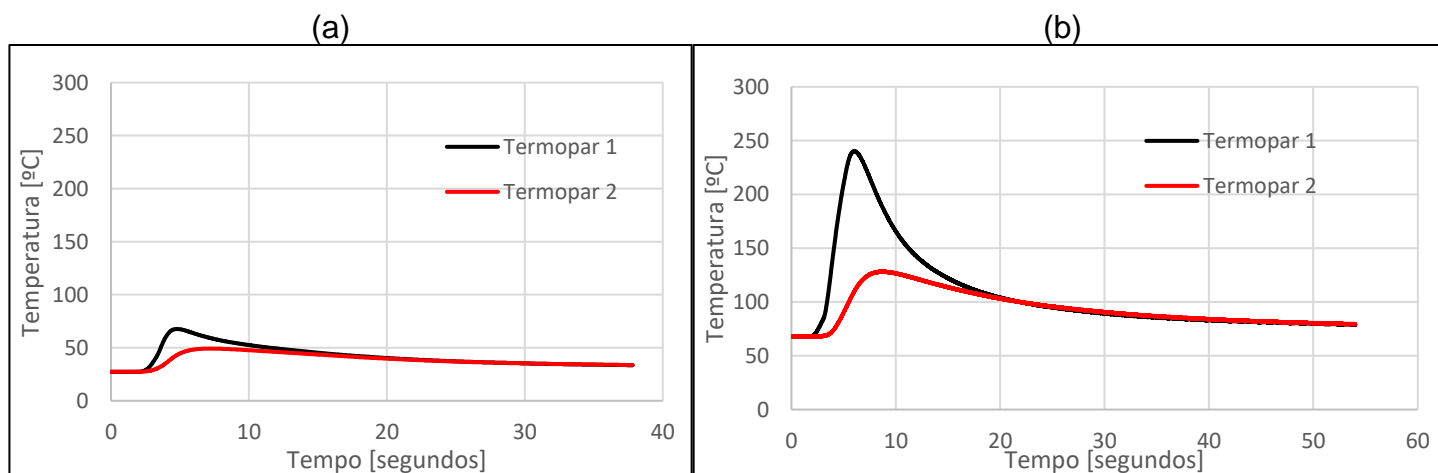


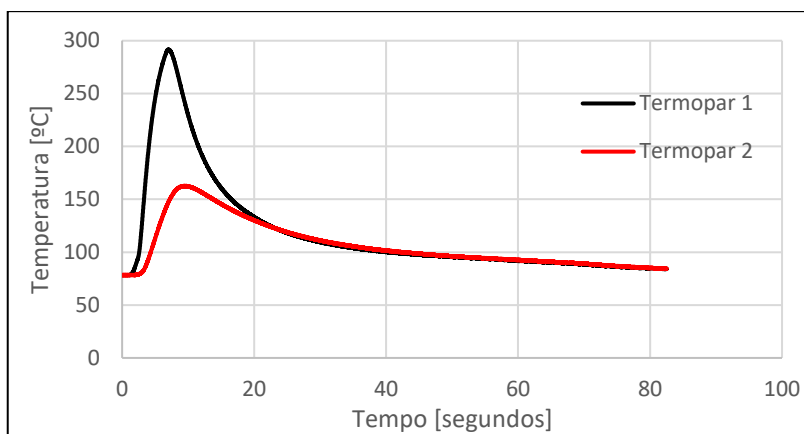
Figura 28 - Perfil de Temperatura S1000\_T0 (a) T0 (b) T2 (c) T4



Fonte: Próprio Autor

Figura 29 - Perfil de Temperatura S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4

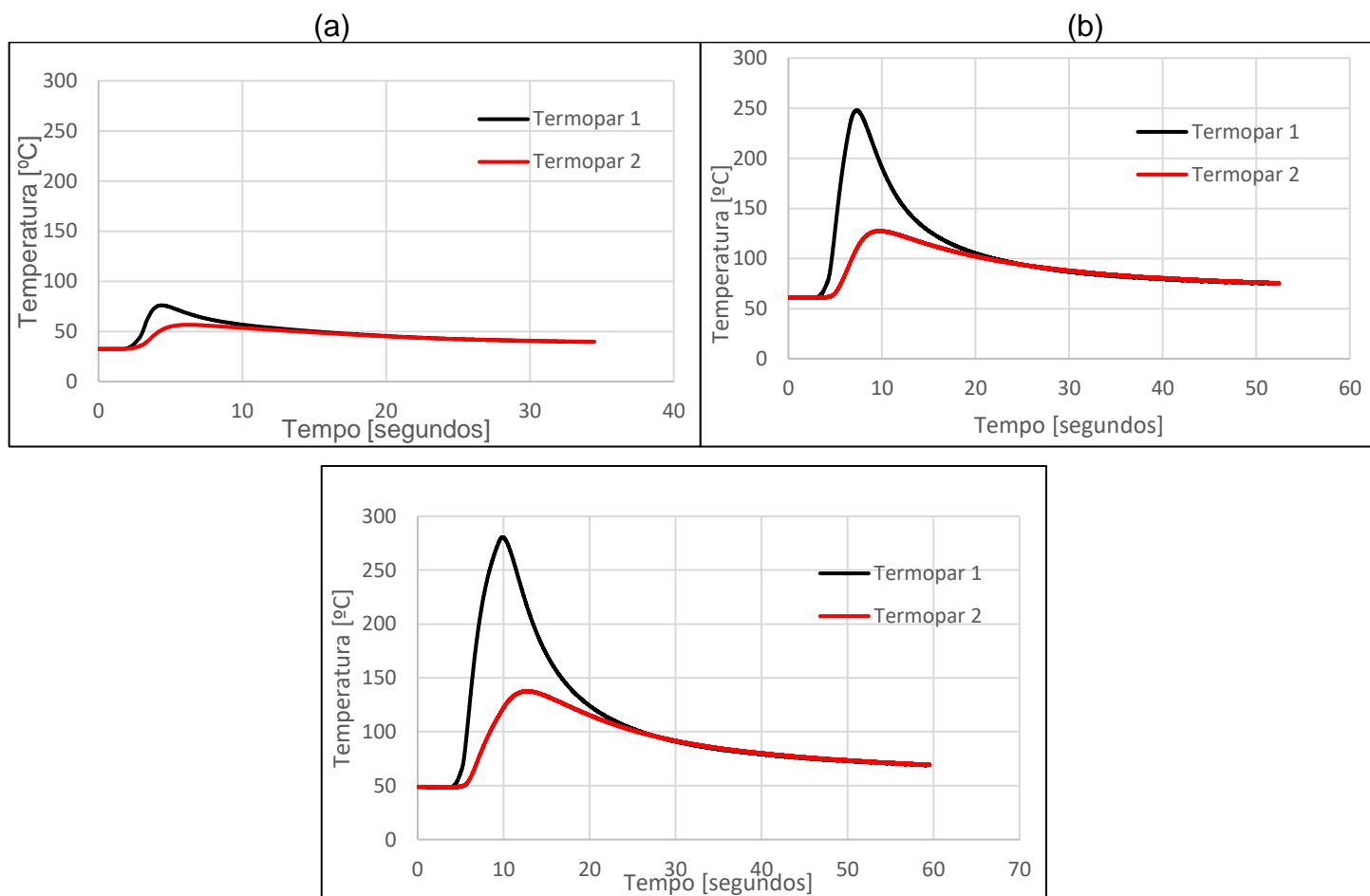




(c)

Fonte: Próprio Autor

Figura 30 - Perfil de Temperatura S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(c)

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 6 mostra as temperaturas máximas medidas pelos dois termopares, assim como os respectivos desvios padrão. Como esperado, o perfil de temperatura medido pelo Termopar 1 (centro do botão) foi maior que aquele medido pelo Termopar 2 (na ZTMA).

Tabela 6 – Resultados de Temperatura média máxima no pino e no ombro

VR [rpm]	TP [s]	Código	Tmédia Máxima (Termopar 1) Pino [°C]	DP Termopar 1 [°C]	Tmédia Máxima (Termopar 2) Ombro [°C]	DP Termopar 2 [°C]
1000	0	S1000_T0	76,4	2,2	55,6	2,1
	2	S1000_T2	205,2	5,0	122,3	2,2
	4	S1000_T4	247,4	11,2	148,4	5,1
2000	0	S2000_T0	64,1	4,5	45,1	4,2
	2	S2000_T2	240,9	3,5	129,8	2,7
	4	S2000_T4	289,9	8,1	161,1	4,1
3000	0	S3000_T0	76,7	3,1	55,9	2,6
	2	S3000_T2	244,8	4,3	128,7	2,2
	4	S3000_T4	280,6	9,0	137,7	11,9

Em linha com o esperado, quando as soldagens são feitas com tempo de permanência o aporte térmico é maior e a temperatura máxima aumenta. Nas soldagens feitas a 1000 e 2000 rpm, o aumento da temperatura com o tempo de permanência é notório ao passar de T=0 para T=2s e T=4s. Já para as soldagens feitas com rotação de 3000 rpm, praticamente não há diferença na temperatura entre o processo realizado com T=2s e T=4s. Este resultado é um indicativo de que na rotação de 3000 rpm, com tempo de permanência de 2s o processo já se encontra próximo do limite máximo de energia. Desta forma, tempos de permanência superiores a 2s só estarão aumentando o tempo de processo (o que é ruim em termos de produção), sem proporcionar ganhos do ponto de vista de aporte de energia e, conseqüentemente, maior área soldada. Também é possível analisar a tabela ANOVA da temperatura máxima no pino e no ombro durante o processo, com confiança de 95%. Os resultados estão mostrados na Tabela 7, onde se vê a significância de cada parâmetro.

Tabela 7 – ANOVA da Temperatura máxima no pino (Termopar 1)

	GL	Soma Quadrática	Contribuição	Média Quadrática	F Valor	P Valor
<b>VR</b>	2	6773,8	1,6%	3386,9	85,5	4,6E-16
<b>TP</b>	2	399548,8	96,5%	199774,4	5043,5	1,1E-53
<b>Interações</b>	4	6026,9	1,4%	1506,7	38,0	6,7E-14
<b>Modelo</b>	8	412349,7		51543,7	1301,2	1,3E-50
<b>Erro</b>	45	1782,4	0,5%	39,6		
<b>Total</b>	53	414132,1	100%			

Fonte: Próprio Autor.

A ANOVA do perfil de temperatura no ombro também foi realizada e o resultado está apresentado na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 – ANOVA da Temperatura máxima no ombro (Termopar 2)

	GL	Soma Quadrática	Contribuição	Média Quadrática	F Valor	P Valor
VR	2	190,3	0,1%	95,1	3,6	0,03
TP	2	93296,0	96,4%	46648,0	1797,1	1,1E-43
Interações	4	2073,2	2,1%	518,3	19,9	1,6E-9
Modelo	8	95559,6		11944,9	460,1	1,6E-40
Erro	45	1168,0	1,2%	25,9		
<b>Total</b>	<b>53</b>	<b>96727,7</b>	<b>100%</b>			

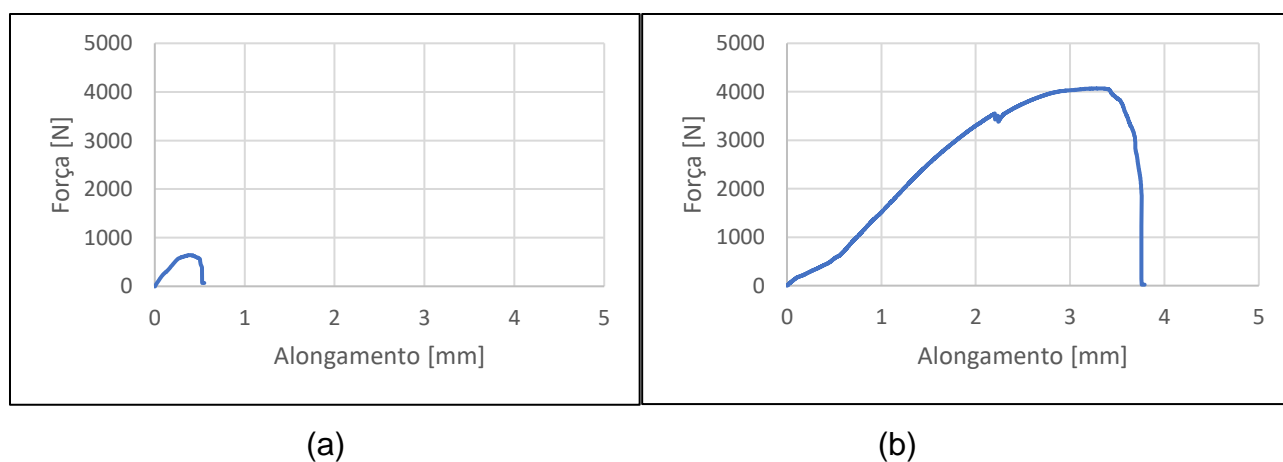
Fonte: Próprio Autor.

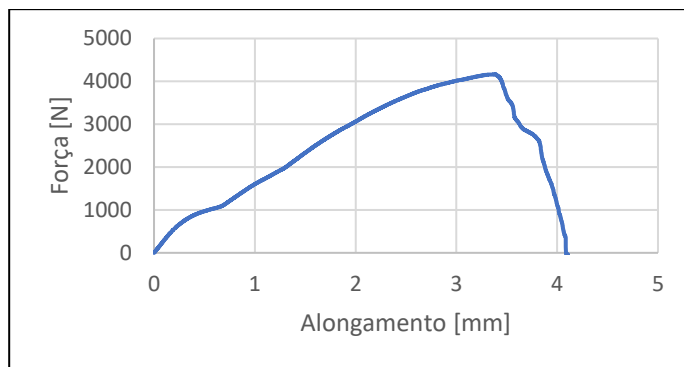
Os dois testes ANOVA para o perfil de temperatura demonstraram que os parâmetros VR e TP são significantes e a interação entre esses dois também tem significância. Pode-se observar que o tempo de permanência tem grande influência na questão de temperatura, tendo uma contribuição em torno dos 96% nos dois termopares.

#### 4.2 Resistência ao Cisalhamento

Do ponto de vista de aplicação estrutural, a resistência e tenacidade da junta são os parâmetros de maior relevância. Para avaliar essas propriedades foram feitos ensaios de cisalhamento. O ensaio de cisalhamento foi realizado para cada uma das combinações de soldagem em estudo, com 5 corpos de prova para cada caso. As Figuras 31 a 33 apresentam as curvas *Força x Alongamento* medidas para cada combinação de soldagem. Estão mostradas as curvas de apenas um corpo de prova para cada combinação. As demais curvas estão colocadas no Anexo II.

Figura 31 - Resultado do ensaio de cisalhamento S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4

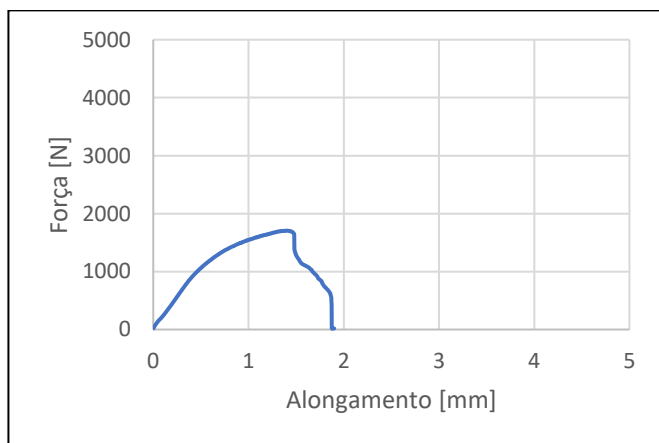




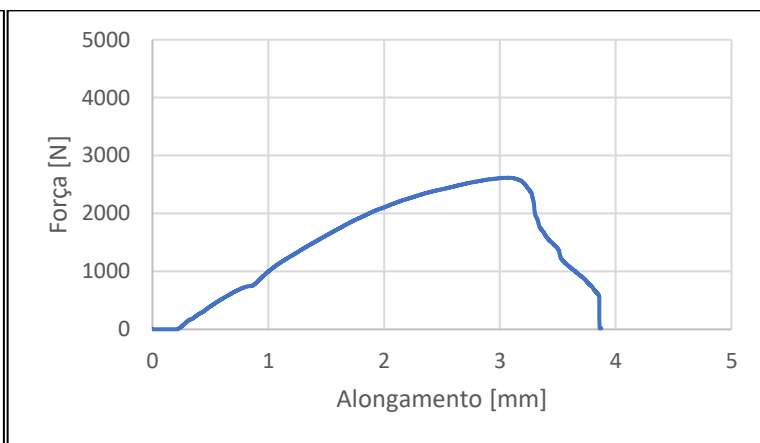
(c)

Fonte: Próprio Autor.

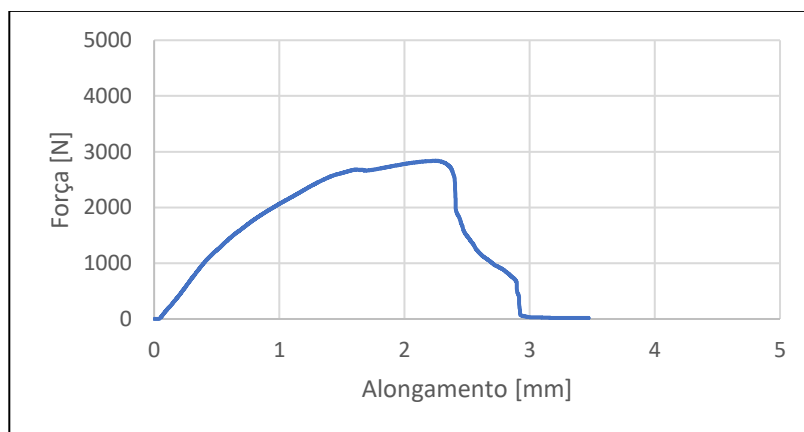
Figura 32 - Resultado do ensaio de cisalhamento S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)



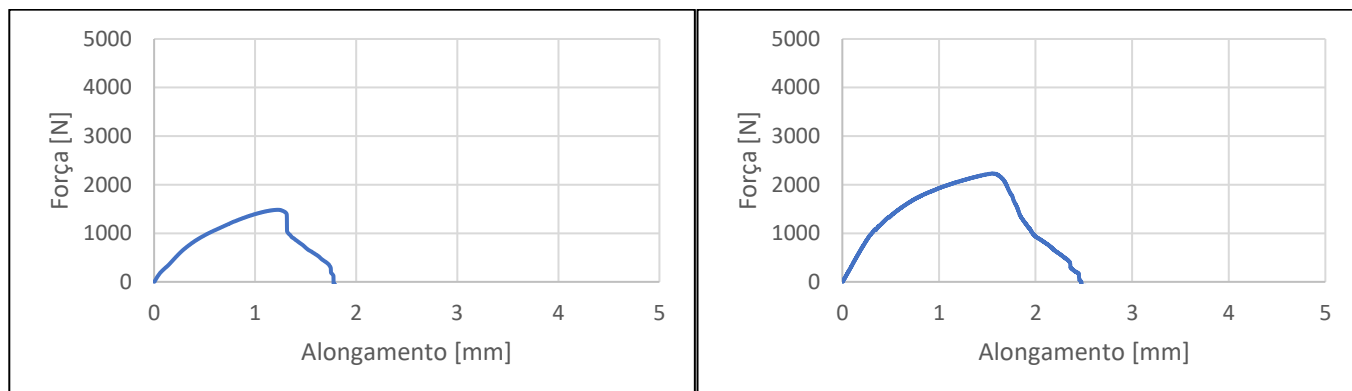
(b)



(c)

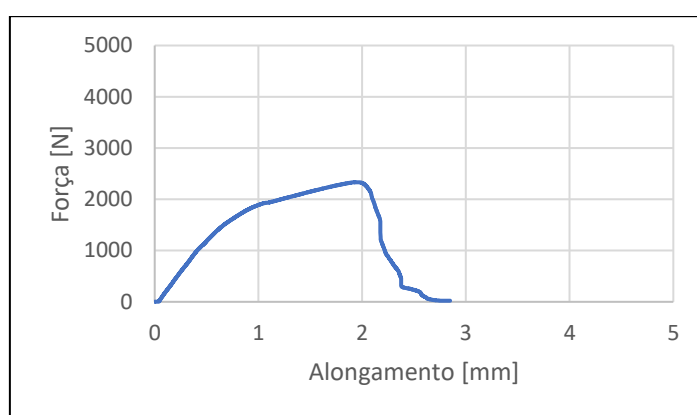
Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 - Resultado do ensaio de cisalhamento S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)

(b)



(c)

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que nas soldagens feitas sem tempo de permanência a resistência é substancialmente inferior em relação àquelas feitas com  $T=2s$  e  $T=4s$ , o que está em linha com o esperado do ponto de vista de aporte térmico. É notório também que as soldagens feitas com rotação de 2000 rpm e 3000 rpm apresentaram resistências muito parecidas, com leve diminuição nas de 3000 rpm. Ademais, as soldagens feitas a 2000 rpm foram as que apresentaram o maior alongamento até a ruptura, indicando uma maior tenacidade em comparação com as soldagens feitas a 3000 rpm. A Tabela 9 apresenta os resultados de carga máxima média e o desvio padrão de cada combinação de soldagem analisada.

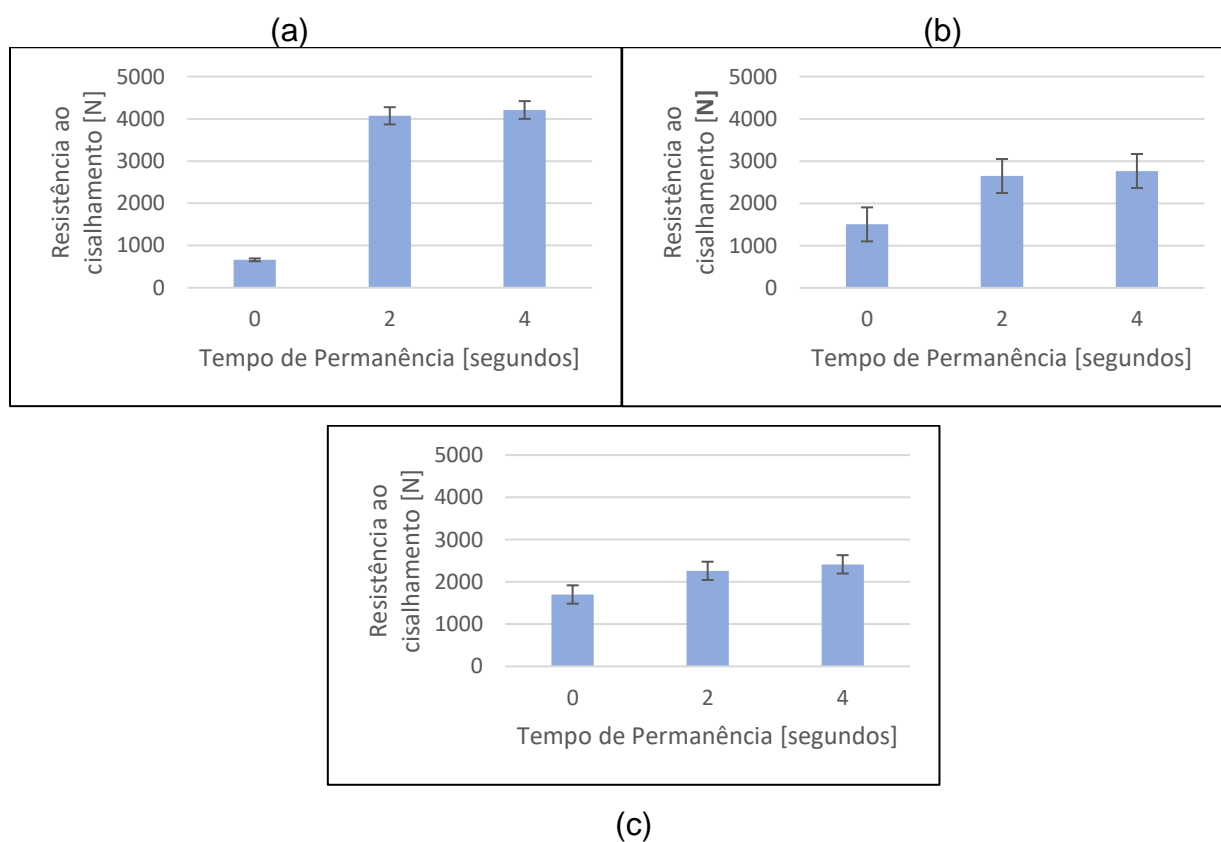
Tabela 9 – Carga e Alongamento máximos

VR [rpm]	TP [s]	Código	Alongamento Máximo médio [mm]	Carga Máxima Média [N]	Desvio Padrão [N]
1000	0	S1000_T0	0,4	661,0	100,7
	2	S1000_T2	2,8	4071,8	87,6
	4	S1000_T4	4,0	4209,0	217,9
2000	0	S2000_T0	1,3	1502,1	167,0
	2	S2000_T2	2,5	2647,5	157,29
	4	S2000_T4	2,6	2765,9	134,9
3000	0	S3000_T0	1,6	1700,7	202,533
	2	S3000_T2	1,7	2260,6	63,7
	4	S3000_T4	1,7	2414,7	159,8

Fonte: Próprio Autor.

Para uma melhor visualização, também foi exposto os valores médios de resistência ao cisalhamento em gráficos de coluna na Figura 33.

Figura 34 – Resistência ao cisalhamento (a) S1000 (b) S2000 (c) S3000



Fonte: Próprio autor.

Estes resultados demonstram que, do ponto de vista de resistência e tenacidade e alongamento, as soldagens feitas a 1000 rpm, de 2s e 4s de tempo de permanência mostram-se com as melhores combinação de soldagem. Por fim, foi realizada uma ANOVA para observar a significância de cada parâmetro de soldagem na resistência máxima das soldas. Os resultados da ANOVA estão mostrados na Tabela 10.

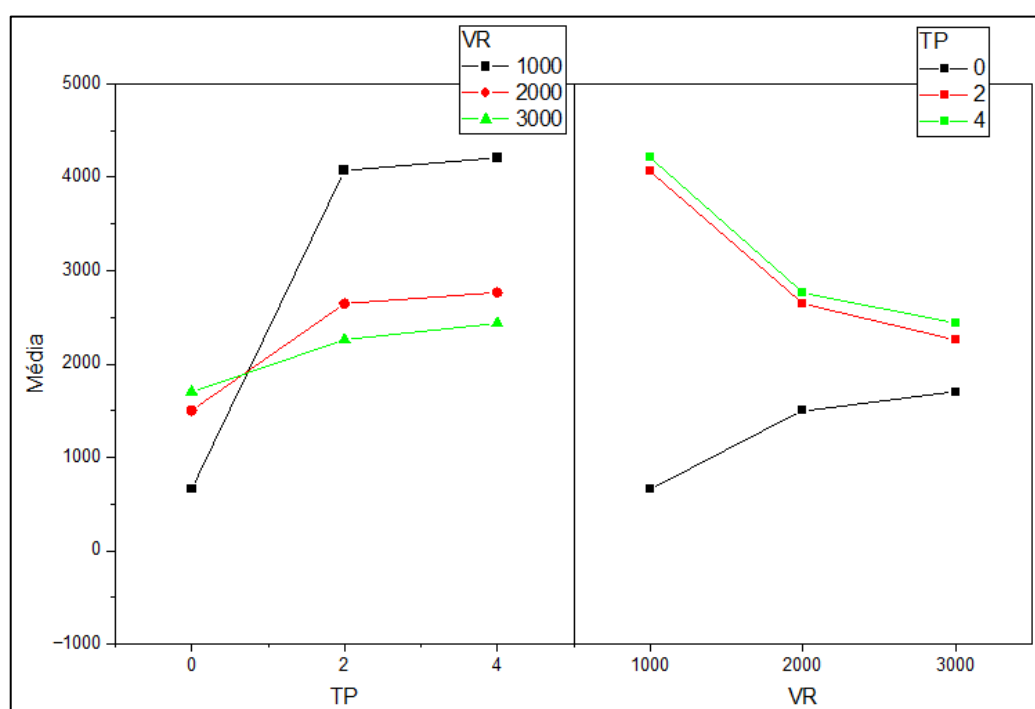
Tabela 10 – ANOVA para o Ensaio de resistência ao cisalhamento

	GL	Soma Quadrática	Contribuição	Média Quadrática	F Valor	P Valor
<b>VR</b>	2	6026539,8	11,4%	3013269,9	133,7	2,1E-17
<b>TP</b>	2	3,1E7	58,8%	1,5E7	704,3	1,3E-29
<b>Interações</b>	4	1,5E7	28,4%	3752084,9	166,5	1,0E-22
<b>Modelo</b>	8	5,2E7		6596927,7	292,7	2,2E-30
<b>Erro</b>	36	811123,8	1,4%	22531,2		
<b>Total</b>	44		100%			

Fonte: Próprio Autor.

O teste ANOVA no ensaio de resistência ao cisalhamento com 95% de confiança evidenciou que os parâmetros VR e TP são significantes para o nível 0,05 e a interação em entre esses dois também tem significância. O tempo de permanência tem a maior contribuição, em torno de 58,8%. A Figura 35 mostra a interação dos parâmetros.

Figura 35 - Interação dos Parâmetros VR e TP para o ensaio de cisalhamento



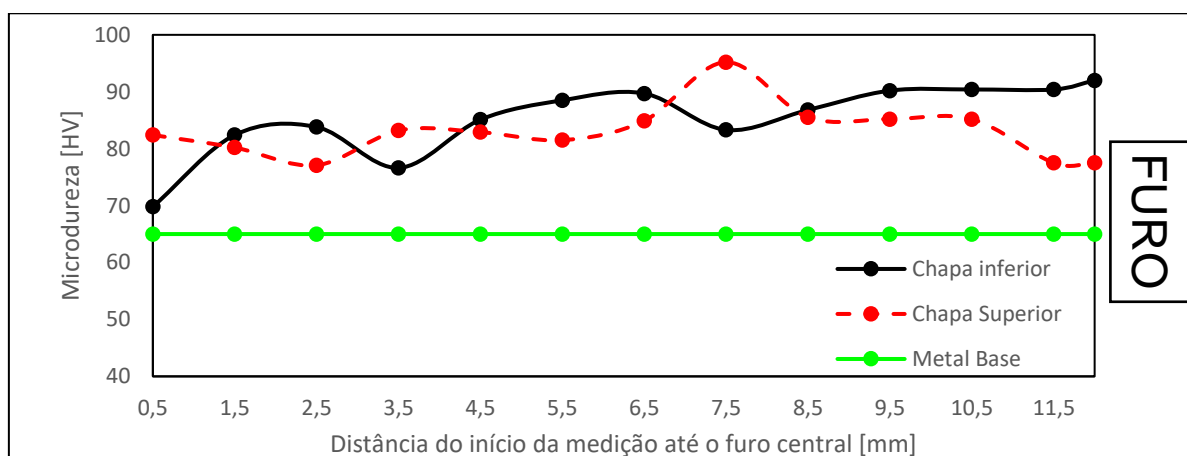
Fonte: Próprio Autor.



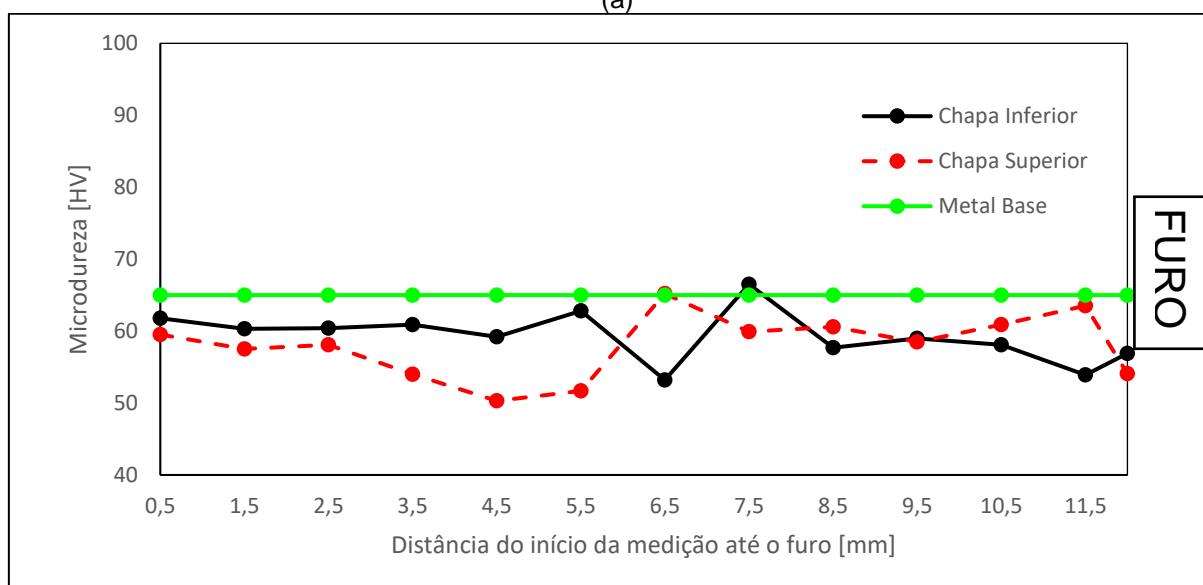
### 4.3 Microdureza

Perfis de microdureza foram medidos na metade da espessura das chapas superior e inferior. Como a soldagem FSSW tem uma natureza simétrica, os perfis são apresentados para apenas um dos lados da amostra. As Figuras 36 a 38 mostram os perfis medidos para cada combinação de soldagem e a medida de microdureza do metal base. O furo central do botão de solda está localizado à direita de cada perfil mostrado.

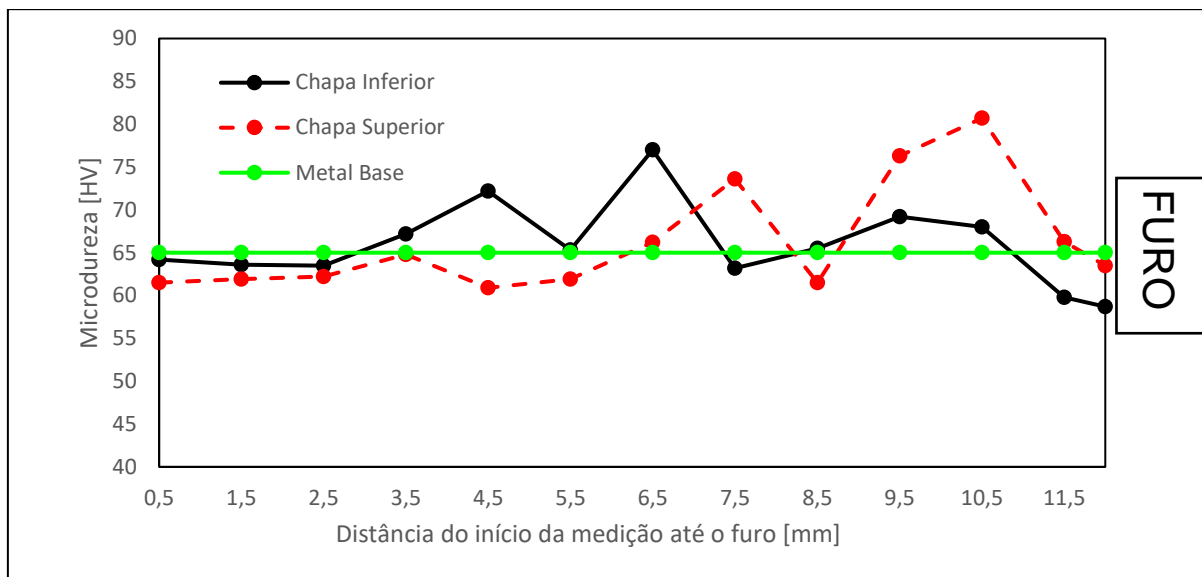
Figura 36 - Perfil de Microdureza S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)



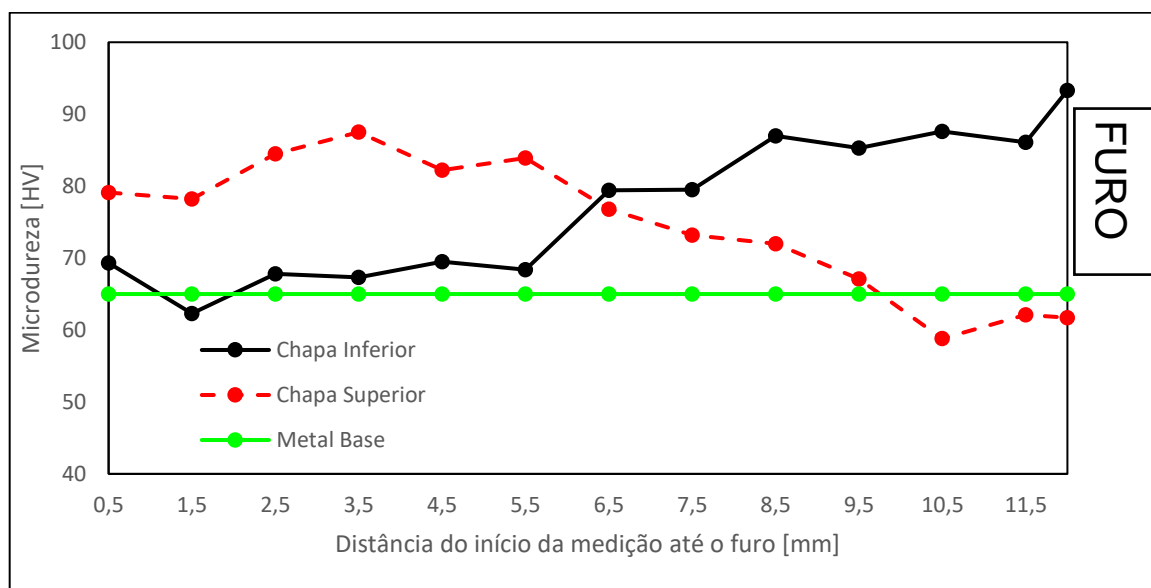
(b)



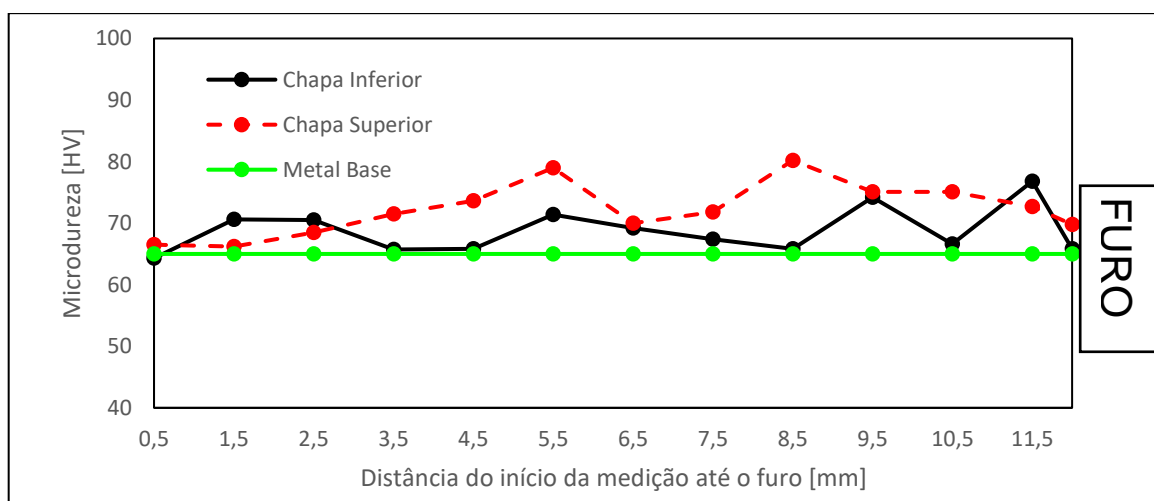
(c)

Fonte: Próprio Autor.

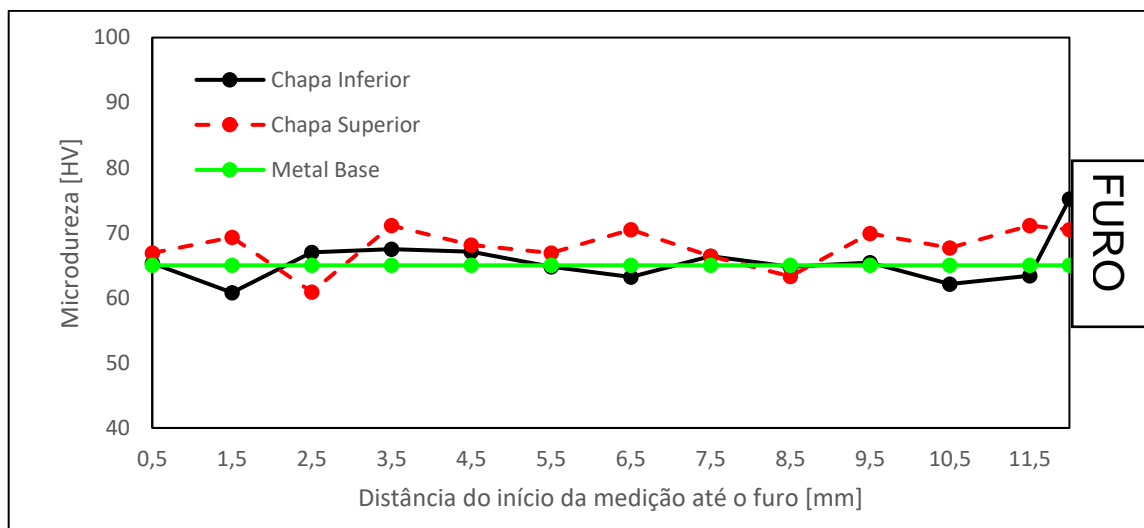
Figura 37 - Perfil de Microdureza S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)



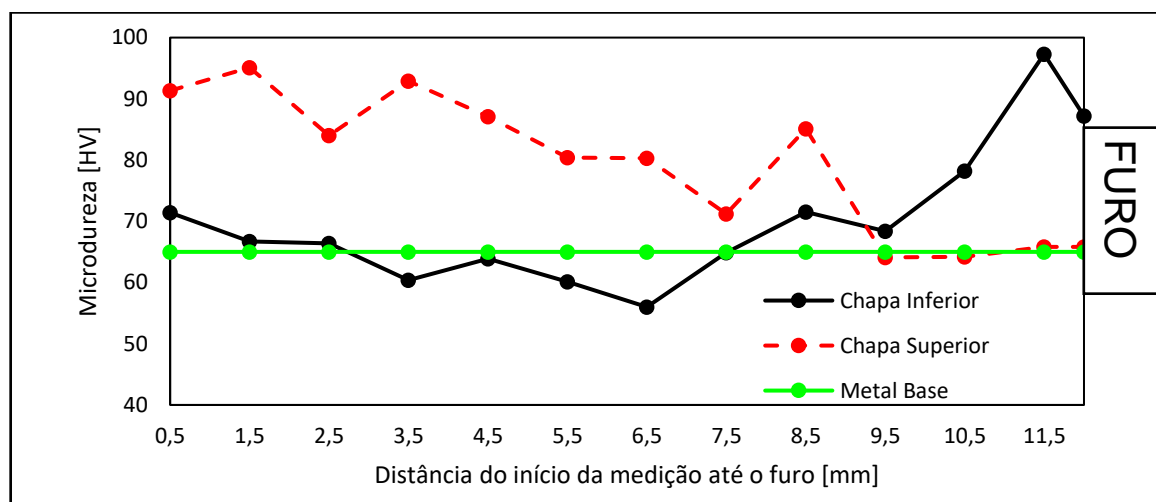
(b)



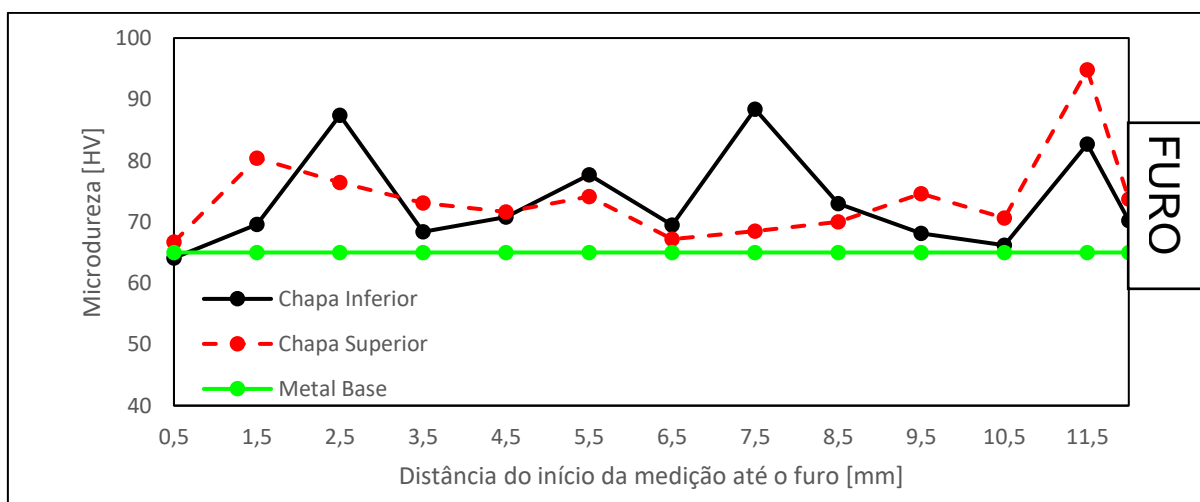
(c)

Fonte: Próprio Autor.

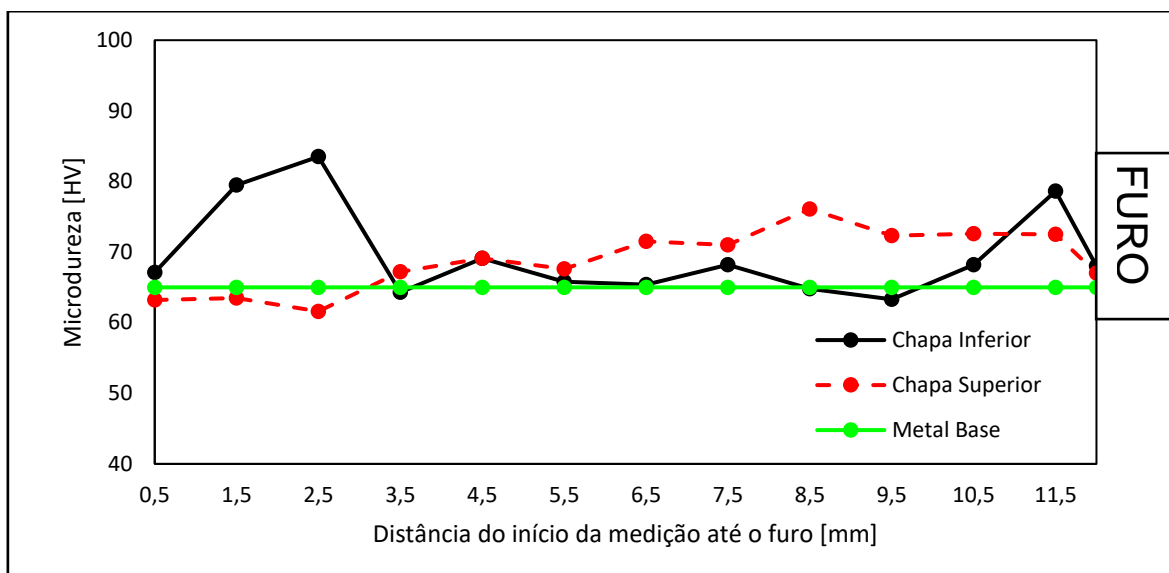
Figura 38 - Perfil de Microdureza S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)



(b)



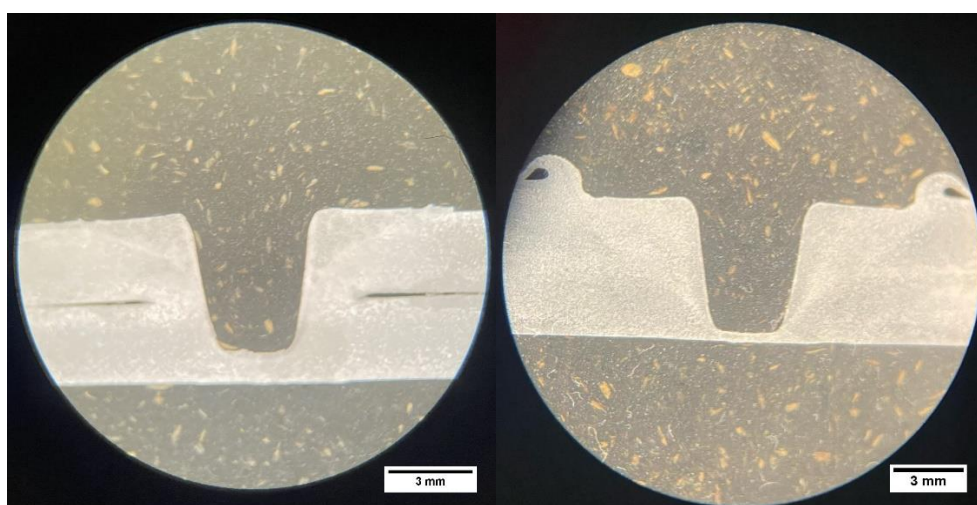
(c)

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4 Análise Metalográfica

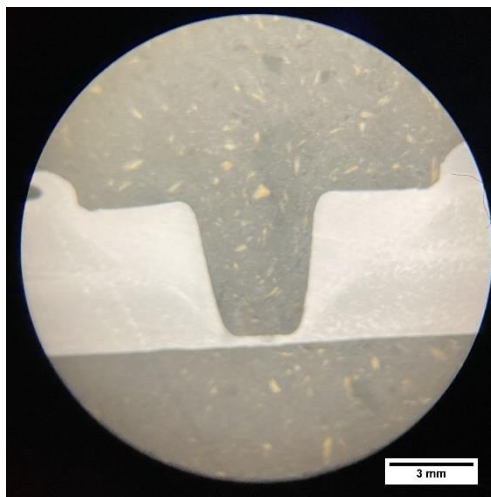
Para avaliar a macroestrutura das juntas soldadas foram feitas análises da macrografia, foi possível observar as zonas da solda, cada vez que adiciona-se tempo de permanência fica mais evidente a zona de mistura. As figuras 39 a 41 mostram macrografias feitas com o auxílio de estereoscópio, onde pode-se visualizar a seção transversal da união.

Figura 39 – S1000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)

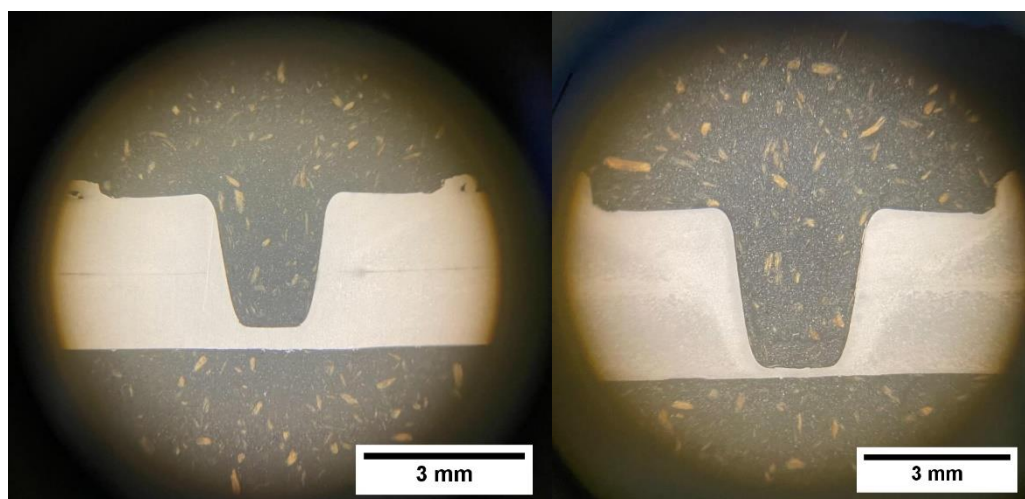
(b)



(c)

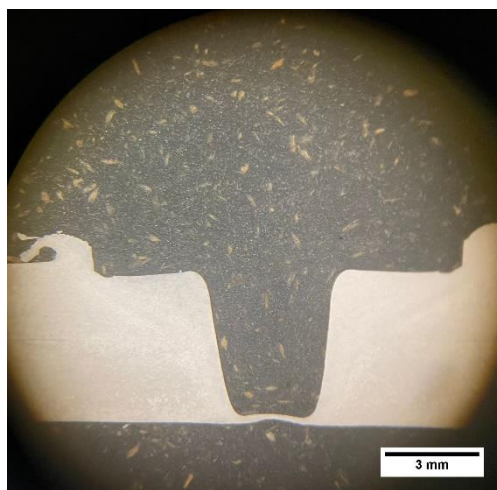
Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 – S2000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



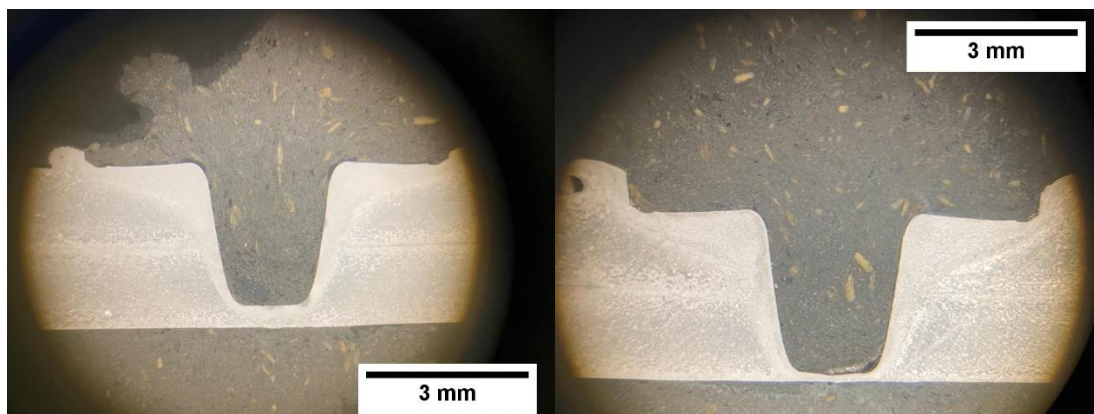
(a)

(b)



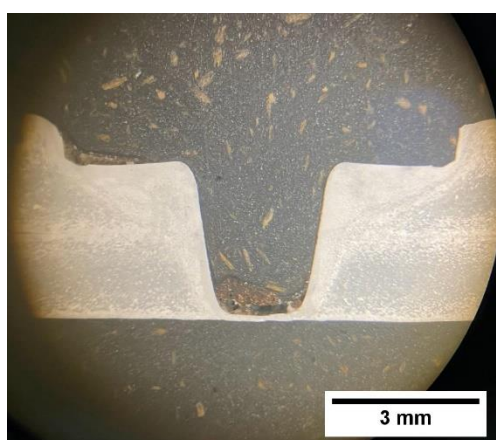
(c)

Figura 41 - S3000 (a) T0 (b) T2 (c) T4



(a)

(b)



(c)

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir de todos os ensaios realizados, mecânicos e metalográficos, foi possível ter uma avaliação ampla de todo processo de soldagem FSSW em juntas de alumínio 6063-T5. Cada etapa do processo colaborou para avaliação dos aspectos mecânicos e metalúrgicos das amostras.

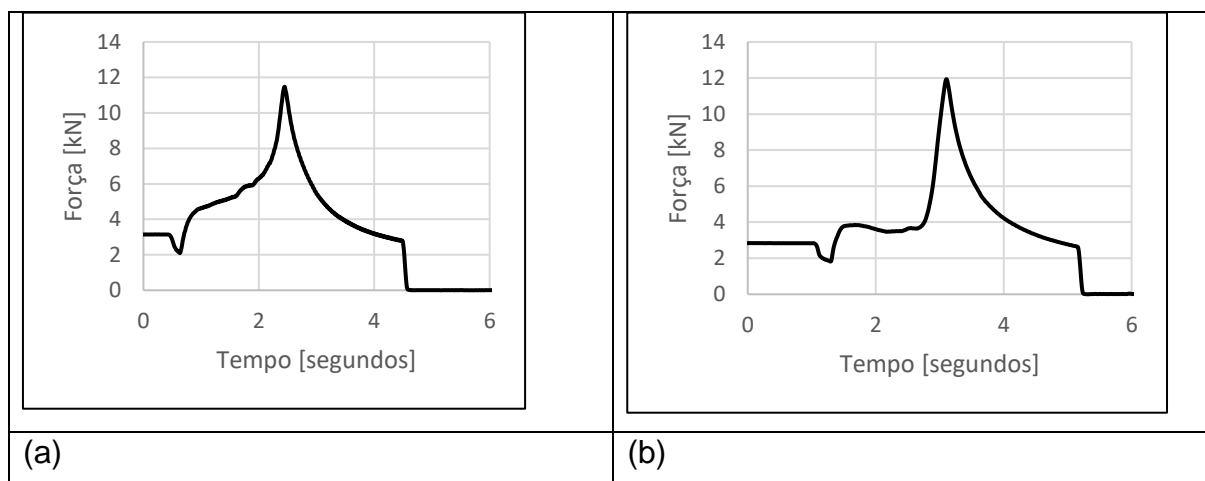
Pela análise da força axial pode-se observar que as rotações de 2000 rpm e 3000 rpm se assemelham em termos da força axial máxima. A rotação de 1000rpm teve uma maior força axial e um menor aporte térmico. ROSENDO *et al.* (2015) relatam que soldas FSSW em liga Al6060-T5, produzidas com pouco tempo de permanência, aliada uma rotação alta, geram juntas com resistência menor e pouca adesão na interface entre as soldas, caracterizando uma “zona parcialmente soldada”. Os resultados de resistência ao cisalhamento obtidos neste trabalho, para a liga Al6063-T5 sugerem o mesmo.

Os perfis de temperatura se apresentaram de forma coerente com o esperado, apresentando uma maior temperatura para as amostras soldadas com tempo de permanência. Além do tempo de permanência, a velocidade de rotação também tem efeito sobre a temperatura durante a soldagem. O pico de temperatura cresce com o aumento da VR e TP. A maior temperatura alcançada nos ensaios foi de aproximadamente 290 °C. Cabe lembrar que os termopares se localizam na superfície inferior das chapas, de forma que a temperaturas medidas são inferiores àquelas que efetivamente ocorrem nas soldas. Contudo, não deve ser muito superior devido à elevada condutividade térmica do alumínio.

As curvas *força x alongamento* obtidas com os ensaios de cisalhamento mostraram que todas as juntas soldadas apresentaram carga máxima elevada e um certo nível de tenacidade, ou seja, nenhuma amostra rompeu de forma frágil. Esse resultado indica que a faixa de parâmetros utilizada produziu soldas de boa qualidade e com união forte entre as chapas. Os melhores resultados foram obtidos para as soldas produzidas a 1000rpm com 2s e 4s de tempo de permanência. A rotação de 3000rpm resultou na diminuição da resistência e tempo de 4s não resultou em aumento da resistência. Esses resultados podem estar relacionados à condição e adesão entre a ferramenta e o material das chapas, o que é referido na literatura como *stick/slip* e já foi reportado por AITA (2017). Aportes de energia muito elevados podem contribuir para o escorregamento da ferramenta, diminuindo o fluxo de material e o tamanho da zona cisalhada, que por sua vez, resulta em uma solda de tamanho

menor. A figura 42 mostra detalhe da força axial medida durante a soldagem em amostras feitas com S2000\_T2 (a) e S3000\_T2 (b)

Figura 42 - Perfis de força axial



Na soldagem feita com 2000rpm/2s (figura 42a) pode-se ver que há um aumento progressivo da força axial durante a penetração do pino da ferramenta enquanto na solda feita com 3000rpm/2s (figura 42b) a força axial permanece aproximadamente constante. A força axial constante indica que o material não impõe resistência à penetração da ferramenta, ou seja, a ferramenta não está plastificando adequadamente o material em sua vizinhança. A partir de dados da literatura, AITA (2017) indica que este fenômeno está associado à perda da adesão entre a ferramenta e o material das chapas, condição denominada de *slip*. Fazendo uma analogia pode-se dizer que no caso da figura 40b o processo de penetração do pino está mais para uma usinagem do que para uma soldagem no estado sólido. Este fenômeno está atrelado à rotação da ferramenta, indicando que há um limite para a adesão completa entre a ferramenta e as chapas (*stick*) localizado entre as rotações de 2000 e 3000rpm. A rotação exata em que ocorre a perda da adesão (*stick/slip*) não pôde ser determinada neste trabalho, pois demandaria a realização de uma nova batelada de soldas entre as rotações de 2000 e 3000rpm, o que extrapola o objetivo do trabalho.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi feito um estudo da soldagem FSSW em juntas de alumínio da liga 6063-T5, com foco no desempenho mecânico, avaliando o efeito dos principais parâmetros de soldagem. Foram realizados ensaios mecânicos para avaliação da resistência, microdureza para mensuração do tamanho das zonas da solda, análise macrográfica para avaliar o tamanho da solda. Também foram investigados os padrões de carga axial e de temperatura durante o processo, buscando subsídios para a interpretação dos resultados. As seguintes conclusões foram obtidas a partir dos resultados e análises deste trabalho:

- O monitoramento de temperatura e força axial são de extrema importância na investigação da soldagem FSSW. Além de contribuírem com dados para o acompanhamento da qualidade do processo, também trazem informações que possibilitam melhor entendimento da correlação parâmetros x propriedades das soldas.
- O centro de usinagem CNC e a ferramenta utilizada se mostram eficientes para obtenção de soldas FSSW de alta qualidade e repetibilidade.
- O tempo de permanência é o principal parâmetro de influência na resistência ao cisalhamento das soldas, dentro da faixa de parâmetros estudada.
- A velocidade de rotação da ferramenta tem efeito importante, mas secundário em comparação ao tempo de permanência.
- Tempo de permanência de 2s e 4s na velocidade de rotação de 1000rpm mostraram os melhores resultados na resistência ao cisalhamento.
- A rotação intermediária de 2000 rpm apresentou resultados de força axial, temperatura e cisalhamento semelhantes com 3000 rpm, indicando que a rotação de 2000 rpm tende a ser mais indicada se for utilizado o critério de tempo e custo de trabalho, pois exige menos trabalho da ferramenta e traz os mesmos efeitos na junta soldada.
- A velocidade de rotação de 3000 rpm contribuiu negativamente na resistência mecânica, possivelmente devido a perda da adesão (slip) ferramenta/chapas durante a soldagem. Tempo de permanência de 4s não mostrou benefício significativo em comparação com tempo de 2s, indicando que só traria maior tempo de processo sem aumento na resistência.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar a soldagem FSSW com diferentes ligas de alumínio, utilizar outras geometrias de ferramentas e avaliar o desempenho mecânico da junta soldada sob fadiga.

## REFERÊNCIAS

AITA, Carlos Alfredo Gracioli. Estudo do desempenho mecânico de juntas soldadas pelo processo de soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW) da liga AA6060-T5. 102 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – **Universidade Federal do Pampa**, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

BADARINARAYAN, H. *et al.* Effect of tool geometry on hook formation and static strenght of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 814-823. 2009.

BALDIM, Adriano Cássio. A influência da soldagem RSW sobre as propriedades magnéticas e tensão residual do aço inoxidável ferrítico AISI 444. Tese de Doutorado, **Universidade Federal de Itajubá** Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, 2019.

BOZZI, S., HELBERT-ETTER, A.L., BAUDIN, T., KLOSEK, V., KERBIGUET, J.G., CRIQUI, B., Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 210, Issue 11, p. 1429-1435, 2010. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.022>.

CAMPANELLI, L. C.; ALCÂNTARA, N. G.; SANTOS, J. F.; Soldagem por Ponto no Estado Sólido de Ligas Leves. **Soldag. insp.** São Paulo, Vol.16, No. 3, p.300-307, 2011.

ESPIRITO-SANTO, Helena e DANIEL, Fernanda. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (3): Guia para reportar os tamanhos do efeito para análises de regressão e ANOVAs. **Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social**, Vol. 4 (1): 43-60, 2018.

FIGUEIREDO, I. C. e SANTO, V. T. S., Análise das Tensões Residuais em Liga de Alumínio 6063-T5 Fundida em molde de Areia Verde. Projeto de Graduação, Universidade Federal Fluminense, 2017.

FONTELLES et al., Metodologia da Pesquisa Científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. **Revista Paraense de Medicina**, v. 23, n. 3, p. 1, 2009.

GAOHUI Li; LI Zhou; WEILU Zhou; XIAOGUO Song; YONGXIAN Huang. Influence of dwell time on microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir spot welded aluminum–copper metals, **Journal of Materials Research and Technology**, Volume 8, Issue 3, Pages 2613-2624, 2019. ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.015>.

GIL, A. C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: **Atlas**, 2008.

JAMILI-SHIRVAN, J., HADDAD-SABZEVAR, M., VAHDATI-KHAKI, J., YAO, K., Non-isothermal crystallization kinetics investigation of different zones at the joining area of a bulk metallic glass welded by friction stir spot welding (FSSW), **Journal of Non-Crystalline Solids**, Volume 533, 2020, ISSN 0022-3093, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119904>.

JEDRASIAK, P., SHERCLIFF, H.R., Small strain finite element modelling of friction stir spot welding of Al and Mg alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 263, Pages 207-222, 2019. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.031>.

KHOSA, S. U., WEINBERGER, T., ENZINGER, N., Thermo-Mechanical Investigations During Friction Stir Spot Welding (FSSW) Of Aa6082-T6. **Welding in the World**, Vol. 54, n° 5/6, 2010.

KLOBČAR, D., TUŠEK, J., SMOLEJ, A., SIMONČIČ, S. Parametric study of FSSW of aluminium alloy 5754 using a pinless tool, **Welding in the World**. 59, p. 269-281, 2015. DOI: 10.1007/s40194-014-0208-x

LATHABAI, S. et al. Friction spot joining of an extruded Al - Mg - Si alloy. **Scripta Materialia**, Woodville, v. 55, p. 899-902, 2006.

LI, G., ZHOU, L., LUO L., WU, X., GUO, N., Microstructural evolution and mechanical properties of refill friction stir spot welded alclad 2A12-T4 aluminum alloy, **Journal of Materials Research and Technology**, Volume 8, Issue 5, Pages 4115-4129, 2019. ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.021>.

LI, M.; ZHANG, C.; WANG, D.; ZHOU, L.; WELLMANN, D.; TIAN, Y. Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Copper: A Review. **Materials** 13, 156. 2020 <https://doi.org/10.3390/ma13010156>

LIU, Y. C., J. J. LIN, B. Y. LIN, C. M. LIN, AND H. L. TSAI, "Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds," **Materials and Design**, vol. 35, pp. 350–357, 2012.

LOPES, Luiz Eduardo. PMR3103 Elementos e Métodos de União/Fixação. Slides da disciplina de Introdução ao projeto de máquinas, USP, 2020. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=80888>> Acesso em Agosto 2022.

MARQUES, Paulo V. *et al.*, Soldagem: Fundamentos e Tecnologia – 3ª edição atualizada – Belo Horizonte: **Editora UFMG**, 2009. ISBN: 978-85-7041-748-0

MAZZAFERRO, C. C. P.; Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço TRIP 800: processo, microestrutura e propriedades. 2008. Tese (Doutor em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2008.

NASCIMENTO, D. F., Estudo do comportamento em fadiga de baixo ciclo e fadiga sob cargas multiaxiais das ligas de alumínio AA6005, AA6063 e AA6351. Tese de Doutorado, **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais**, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, Andréia Fróes Galuci. Testes Estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.5, n° 6, p.777-788 Novembro/Dezembro 2008.

OLIVEIRA, Fábio Machado. Análise de variância aplicada em pesquisas sociais. **Linkania Revista Científica**, ISSN: 2236-6660. Edição 7, volume 1, artigo nº 2, 2013.

OLIVIECKI, N. J. e BESKOW, A. B., Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga De Alumínio. **PERSPECTIVA, Erechim**. v.37, n.138, p.15-29, 2013.

PANDEY, A. K. e MAHAPATRA, S. S., Investigation of Weld Zone obtained by Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Aluminium-6061 Alloy. **Materials Today: Proceedings** Volume 18, p. 4491–4500, 2019.

PARRA, B. *et al.*, An investigation on friction spot welding in AA6181-T4 alloy. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 184-190, 2011. doi: 10.4322/tmm.2011.029

PAYTON, L. N. Metal Cutting Theory and Friction Stir Welding. Trends in Welding Research. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

PAZ, G. e MAZAFERRO, J. E., Análise de juntas de alumínio soldadas por processos de soldagem baseados em fricção. Pôster Gpfai, UFRGS, 2011.

PICCINI, J. M. e SVOBODA, H. G., Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints. **Procedia Materials Science**, Volume 9, p. 504 – 513, 2015.

PICCINI, J. M. e SVOBODA, H. G., Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints, **Journal of Manufacturing Processes**, Volume 26, Pages 142-154, 2017. ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.004>.

RIBOLDI, Joao. Análise de Variância. Notas de apoio didático da disciplina de Análise de Estatística dos Cursos de Pós-Graduação em Agronomia. **UFRGS**, Instituto de Matemática, 1995.

ROSENDO, T. D. S. Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (FSPW) da liga AA6181-T4. Tese de Doutorado - **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2009.

ROSENDO, T.; TIER, M.; MAZZAFERRO, J.; MAZZAFERRO, C.; STROHAECKER, T.R.; DOS SANTOS, J.F. Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading. **Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.** 38, p. 1443–1455. 2015.

RUIZ, D. C. & BATALHA, G. F. Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência. In: **Corte e Conformação**, v.2, n. 13, 124-136. 2006.

SANTOS, G. S., A Indústria Automobilística e o Meio Ambiente: Uma Visão Sustentável. **VII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**, p. 742-751, 2015. ISSN 2447-0635

SARKAR, R., PAL, T.K., SHOME, M., Material flow and intermixing during friction stir spot welding of steel, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 227, Pages 96-109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.006>.

SEKHAR, S. R., CHITTARANJANDAS, V., GOVARDHAN, D., KARTHIKEYAN, R., Effect of Tool Rotational Speed on Friction Stir Spot Welded Aa5052 – H38 Aluminum Alloy. **Materials Today: Proceedings** Volume 5, p. 5536–5543, 2018.

SINGH, V. P., PATEL, S. K., RANJAN, A. E KURIACHEN, B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review, **Journal of Materials Research and Technology**, Volume 9, Issue 3, Pages 6217-6256, 2020. ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.008>.

SIQUEIRA, Rafael H. M. *et al.*, Comparação das propriedades mecânicas de juntas de alumínio obtidas por soldagem a laser (LBW), por friction stir welding (FSW) e rebitadas para aplicação em estruturas aeronáuticas. **Soldag. Insp.** São Paulo, Vol. 19, Nº. 02, p.145-151, Abr/Jun 2014

SOUZA, D. M. *et al.*, Estudo das propriedades mecânicas, microestruturais e tensões residuais da liga de alumínio aa 5083-h111 soldadas por friction stir welding – FSW. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, Salvador-BA, 2015.

SUN, Y.F., FUJII, H., SATO, Y., MORISADA, Y., Friction stir spot welding of SPCC low carbon steel plates at extremely low welding temperature, **Journal of Materials Science & Technology**, Volume 35, Issue 5, Pages 733-741, 2019. ISSN 1005-0302, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.11.011>.

SURYANARAYANAN, R., SRIDHAR, V.G. Effect of Process Parameters in Pinless Friction Stir Spot Welding of Al 5754-Al 6061 Alloys. **Metallography, Microstructure, and Analysis** 9, 261–272, 2020 <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00626-5>

XIE, Y., YONGXIAN HUANG, XIANGCHEN MENG, JUNCHEN LI, JIAN CAO, Friction stir spot welding of aluminum and wood with polymer intermediate layers, **Construction and Building Materials**, Volume 240, 117952, 2020. ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117952>.

YANG, X. W., T. FU, W. Y. LI, "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling", **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2014, Article ID 697170, 11 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/697170>

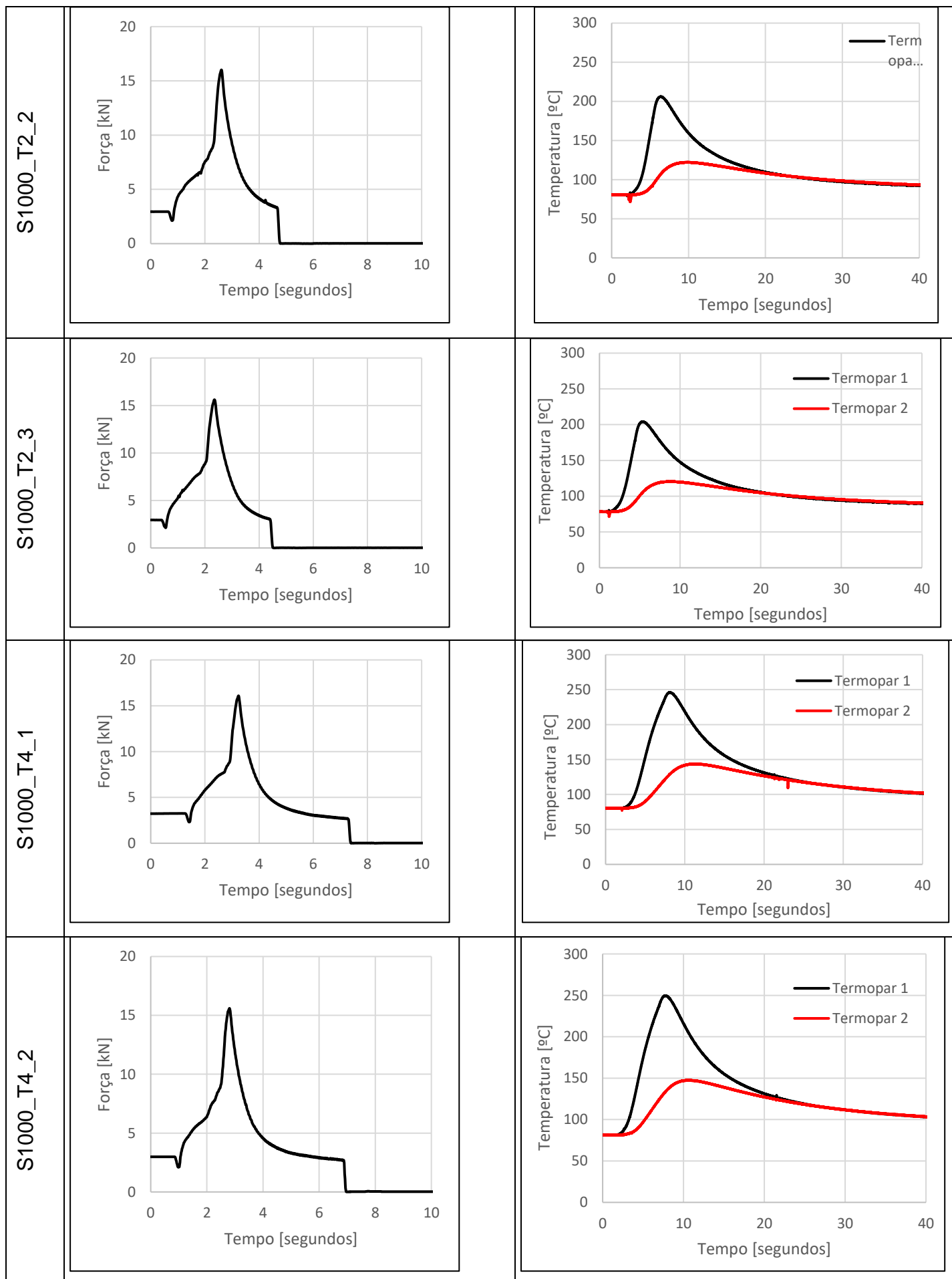
ZHOU, L., LI, G.H., ZHANG, R.X., ZHOU, W.L., HE, W.X., HUANG, Y.X., SONG, X.G., Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir spot welded dissimilar aluminum-copper joint, **Journal of Alloys and Compounds**, Volume 775, Pages 372-382, 2019. ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.045>.

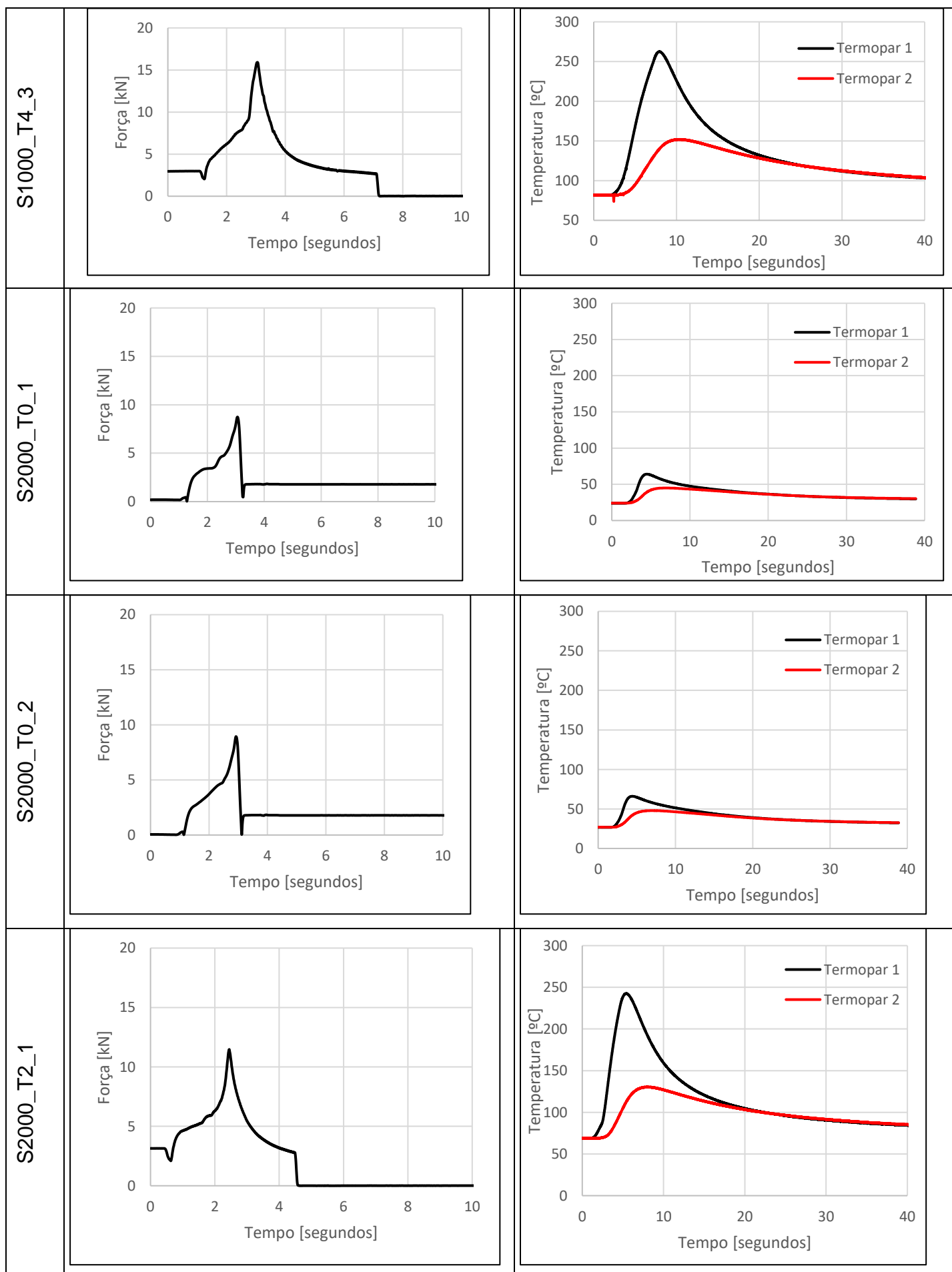
ZIEDAS, Selma e TATINI, Ivanisa, Soldagem – Coleção Tecnologia – **SENAI**, 1ª ed. São Paulo, 1997.

## ANEXO I

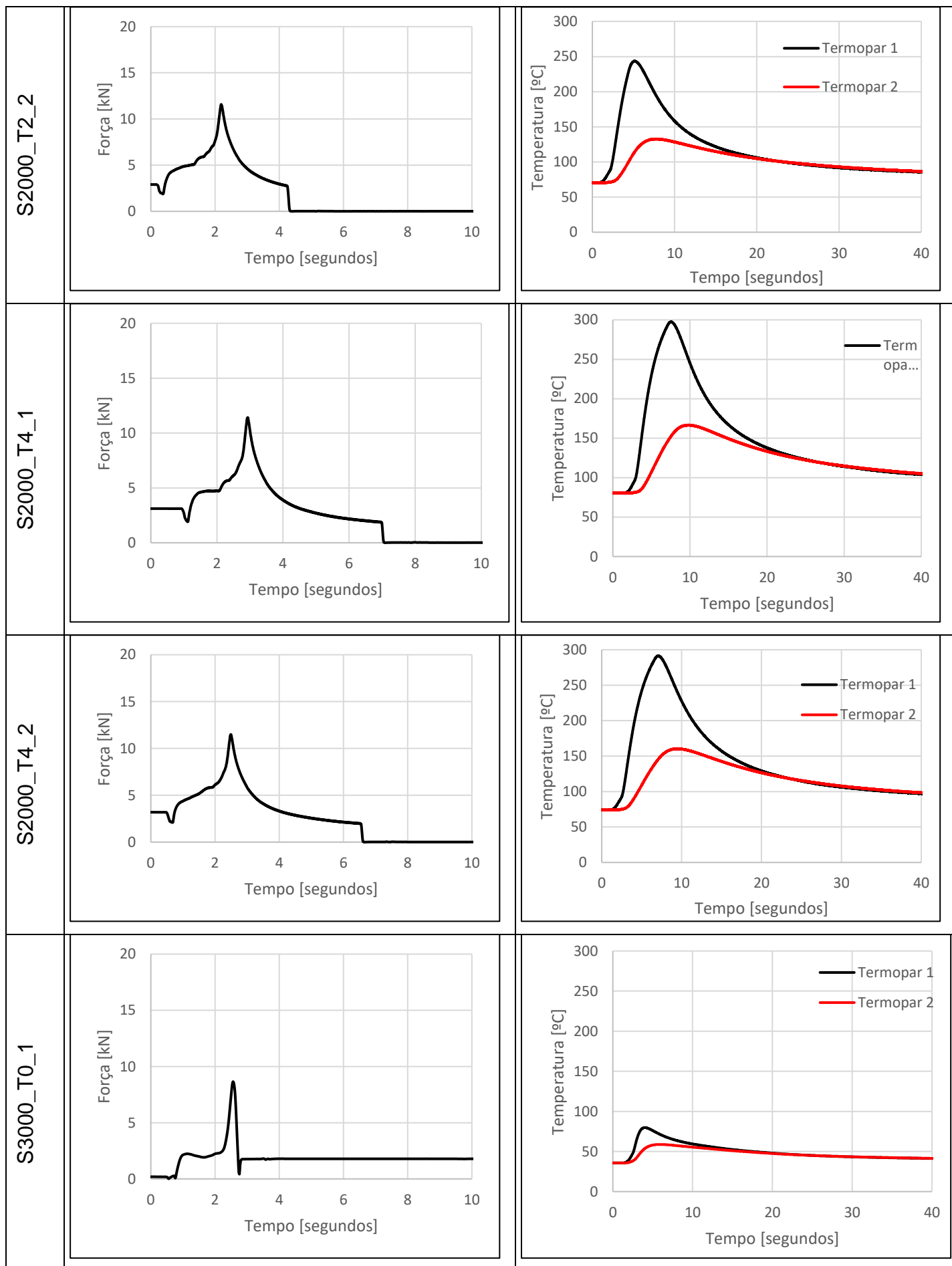
## Perfil de força axial e temperatura

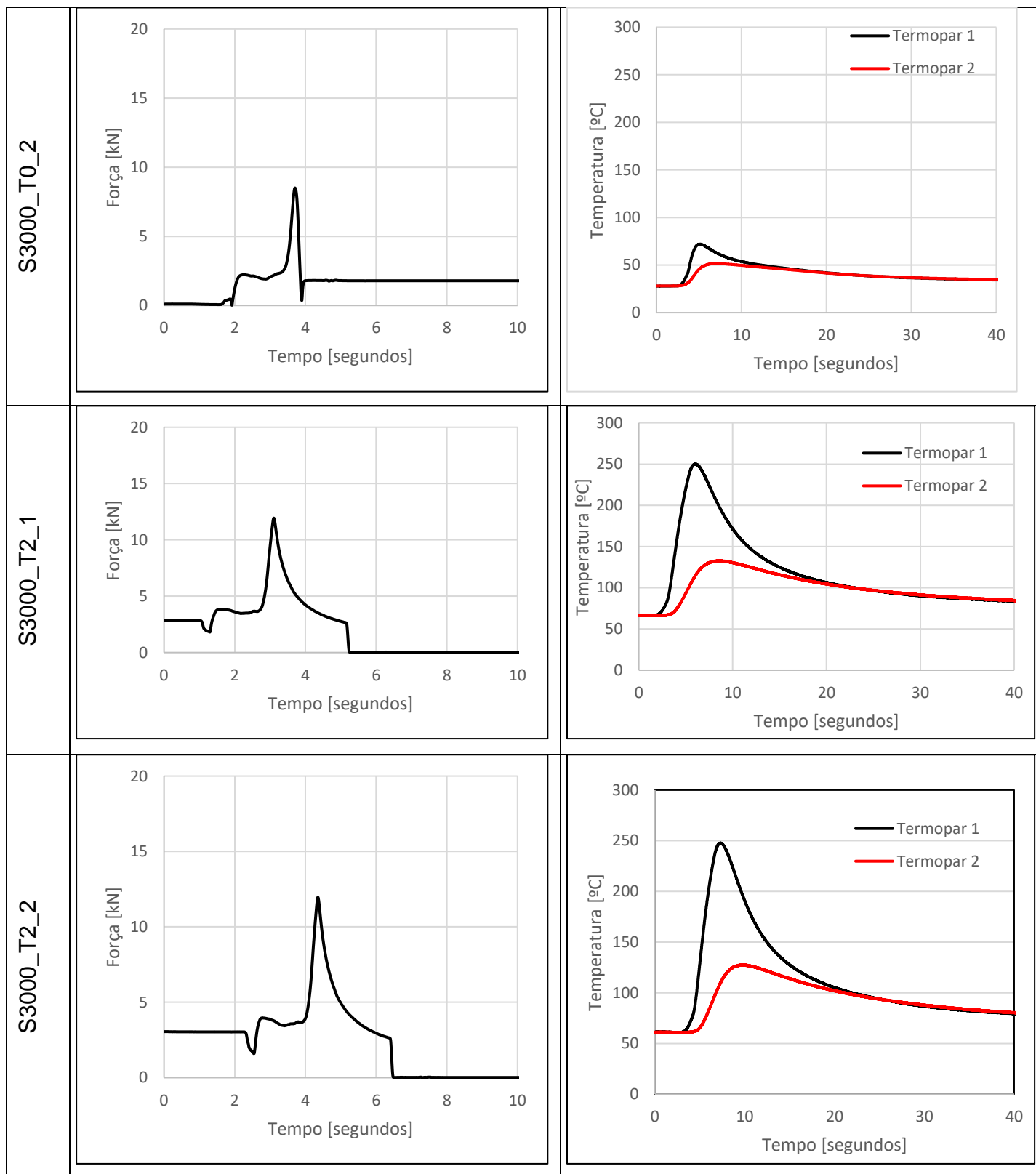
	Força Axial	Temperatura
S1000_TO_1		
S1000_TO_2		
S1000_TO_3		
S1000_T2_1		

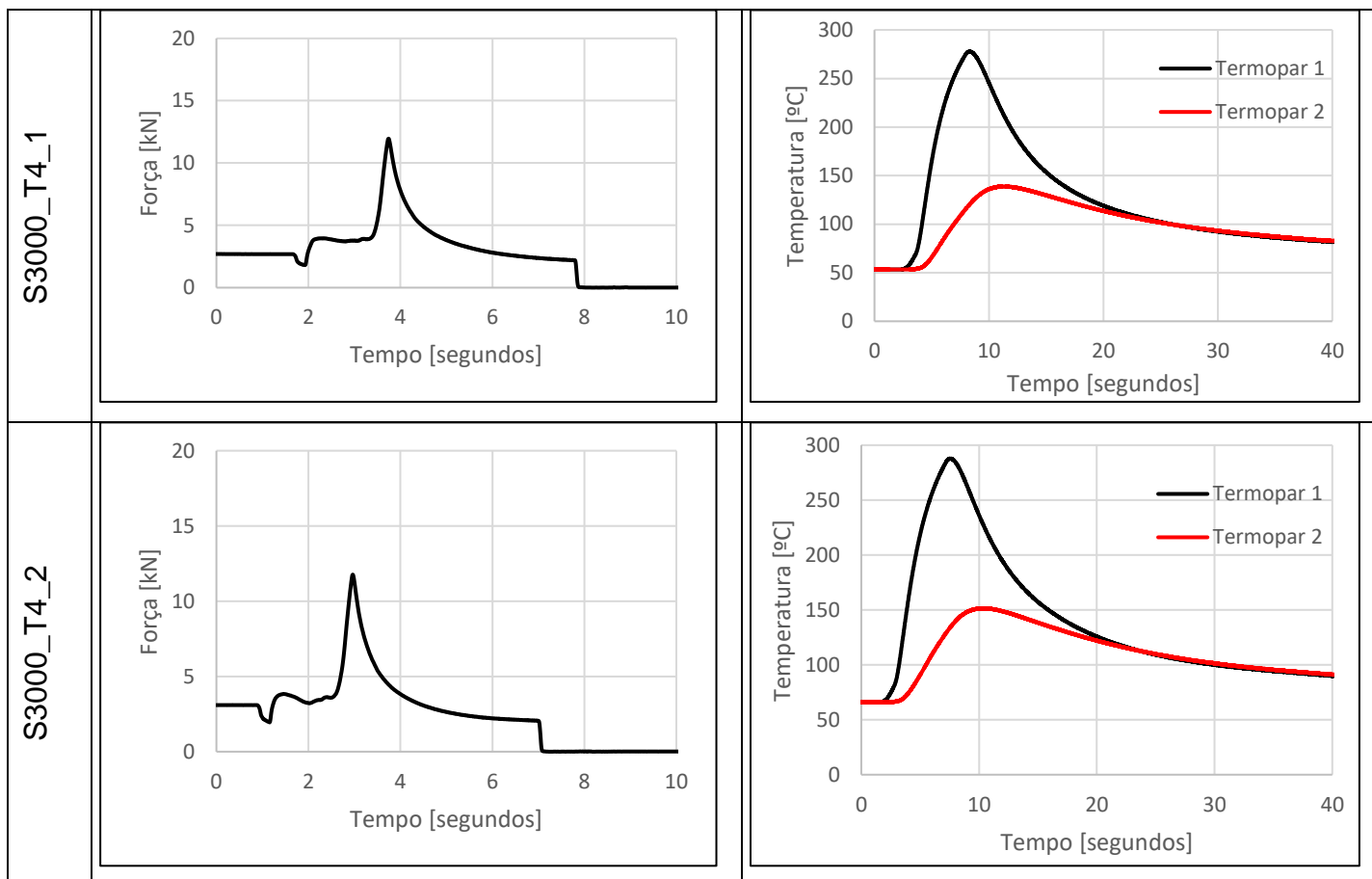












## ANEXO II

## Ensaio de cisalhamento

