

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ANDRESSA SAUZEM ROCHA**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA SOLDAGEM DE FRICÇÃO  
POR PONTO E MISTURA MECÂNICA (FSSW) DA LIGA AA6060T5**

**Alegrete**

**2023**

**ANDRESSA SAUZEM ROCHA**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA SOLDAGEM DE FRICÇÃO  
POR PONTO E MISTURA MECÂNICA (FSSW) DA LIGA AA6060T5**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**Alegrete**

**2023**

**ANDRESSA SAUZEM ROCHA**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA SOLDAGEM DE FRICÇÃO POR PONTO  
E**

**MISTURA MECÂNICA (FSSW) DA LIGA AA6060T5**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em: 04 de julho de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr Tonilson de Souza Rosendo  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr Aldoni Gabriel Wiedenhof  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr Cristian Pohl Meinhardt  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/07/2023, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/07/2023, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/07/2023, às 16:57, 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 **1172125** e o código CRC **F73C3113**.

## RESUMO

O processo FSSW surgiu no ramo automotivo com o intuito de ser uma forma alternativa de soldagem em ligas leves, para minimizar ou até mesmo evitar os problemas que ocorrem na união de ligas de alumínio por técnicas convencionais. Esse processo de soldagem se demonstrou vantajoso devido às boas propriedades mecânicas e baixo custo. No entanto, a otimização do processo FSSW pode ser difícil, pois as propriedades mecânicas são fortemente afetadas pelos parâmetros de soldagem e tipo de ferramenta. O presente Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso possui como objetivo investigar o efeito da geometria do pino da ferramenta no processo de soldagem FSSW em liga de alumínio 6060-T5. O método utilizado foi a soldagem FSSW em 24 amostras de juntas sobrepostas. As chapas de 3 mm de espessura foram soldadas com duas ferramentas diferentes para a análise comparativa entre elas, uma convencional cônica e a outra com geometria hexagonal cônica. Os parâmetros utilizados para o estudo foram a velocidade de rotação (VR) constante de 2000 rpm, e velocidade de penetração (VP) constante de 200 mm/min. Como variável de estudo foi adotado o tempo de permanência (TP) onde foram estabelecidos os valores de 0, 2 e 4 s. Após as soldagens, as amostras foram submetidas à medição de microdureza, ensaio metalográfico e ensaio de cisalhamento, para análise das propriedades metalúrgicas e mecânicas da junta. Assim obteve-se como conclusão que para a ferramenta hexagonal, o tempo de permanência se demonstrou fundamental para haver ligação metalúrgica em TP = 0 s, e em TP = 2 s e TP = 4 s a resistência ao cisalhamento aumentou com o aumento do TP. No entanto, a resistência ao cisalhamento da ferramenta hexagonal foi inferior, em comparação a ferramenta convencional em todos os TP. Os ensaios de microdureza e metalográficos não demonstraram correlação com os resultados do ensaio de cisalhamento.

Palavras-Chave: FSSW, parâmetros, ferramenta.

## ABSTRACT

The FSSW process emerged in the automotive industry with the intention of being an alternative way of joining in light alloys, to minimize or even avoid the problems that occur in the union of aluminum alloys by conventional techniques. This treatment process is controlled due to good mechanical properties and low cost. However, optimizing the FSSW process can be difficult as the mechanical properties are strongly supported by direction and tool type parameters. This Course Completion Work Project aims to investigate the effect of tool pin geometry on the FSSW processing process in aluminum alloy 6060-T5. The method used was the FSSW acceptance in 24 Exception of overlapping joints. The 3 mm thick plates were welded with two different tools for the comparative analysis between them, one conventional conical and the other with conical hexagonal geometry. The parameters used for the study were a constant rotation speed (VR) of 2000 rpm, and a constant penetration speed (VP) of 200 mm/min. As a study variable, the residence time (TP) was adopted, where values of 0, 2 and 4 s were reached. After welding, the samples underwent microhardness measurement experiments, metallographic testing and shear testing, to analyze the metallurgical and mechanical properties of the joint. Thus, we obtained and concluded that for the hexagonal tool, the dwell time was fundamental for metallurgical bonding to occur at TP = 0 s, and at TP = 2 s and TP = 4 s, the shear strength increased with the increase in TP. However, the shear strength of the hexagonal tool was lower compared to the conventional tool in all TP. Microhardness and metallographic tests not required with shear test results.

Keywords: FSSW, parameters, tool.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- DESENHO ILUSTRATIVO DO PROCESSO FSSW.....	17
FIGURA 2- FLUXO DE MATERIAL. ....	18
FIGURA 3- IMAGEM DE UMA JUNTA TIPICA OBTIDA POR FSSW.....	18
FIGURA 4- DESENHO ILUSTRATIVO DO PINO E OMBRO DA FERRAMENTA.....	19
FIGURA 5- ZONAS AFETADAS EM UMA JUNTA FSSW. ....	20
FIGURA 6- MICROESTRUTURA NA REGIÃO SOLDADA POR FSSW. ....	21
FIGURA 7 - IMAGENS DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS. ....	25
FIGURA 8: IMAGEM DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS POR HANDE GÜLER.....	25
FIGURA 9: IMAGEM ILUSTRATIVA DAS FERRAMENTAS. ....	26
FIGURA 10: ILUSTRAÇÃO DA FERRAMENTA. ....	27
FIGURA 11: IMAGEM ILUSTRATIVA DAS FERRAMENTAS. ....	27
FIGURA 12: IMAGEM ILUSTRATIVA DAS FERRAMENTAS. ....	28
FIGURA 13: DESENHO TÉCNICO DA FERRAMENTA CONVENCIONAL. ....	30
FIGURA 14: FERRAMENTAS INVESTIGADAS: A) PINO CÔNICO CONVENCIONAL E B) PINO SEXTAVADO.....	30
FIGURA 15 - ROMI D800. ....	31
FIGURA 16 - SPIDER 8 DA HBM. ....	32
FIGURA 17 - A) SHIMADZU AGS-X 5kN. B) REPRESENTAÇÃO DO ENSAIO.....	33
FIGURA 18 - MICRODURÔMETRO MODELO BUEHLER MICROMET 6010 .....	34
FIGURA 19 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO ENSAIO DE MICRODUREZA. ....	34
FIGURA 20 - A) BUEHLER ISOMET 4000. B) BOTÃO DE SOLDA E CORPO DE PROVA.....	35
FIGURA 21 - MICROSCÓPIO ÓTICO. ....	35
FIGURA 22 - AMOSTRA SOLDADA. ....	36
FIGURA 23 - GRAFICO DO ENSAIO DE CISLHAMENTO.....	37
FIGURA 24 - GRAFICO MÉDIA DE CISLHAMENTO E ERRO.....	38
FIGURA 25 - FORÇA AXIAL X TEMPO, FERRAMENTA 4-C4.....	38
FIGURA 26 - CARGA AXIAL X TEMPO .....	39
FIGURA 27 - MACROGRAFIA DA SEÇÃO DIREITA DE UMA AMOSTRA PÓS PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA MOSTRANDO AS POSIÇÕES DAS INDENTAÇÕES.....	40
FIGURA 28 – PERFIL DE MICRODUREZA DA AMOSTRA 4-C4 – CONVENCIONAL DE 4 S.....	41
FIGURA 29- PERFIL DE MICRODUREZA DA AMOSTRA 4-H4 – HEXAGONAL DE 4 S.....	41
FIGURA 30 - PERFIL DE MICRODUREZA DA AMOSTRA 4-C0 – CONVENCIONAL DE 0 S.....	42
FIGURA 31 - IMAGEM DA AMOSTRA 4-C0. ....	42

FIGURA 32 - IMAGENS MACROGRÁFICAS DAS AMOSTRAS. ....	43
FIGURA 33 - IMAGENS MICROGRÁFICAS DAS AMOSTRAS. ....	44
FIGURA 34 - GRÁFICOS CARGA AXIAL X TEMPO DA FERRAMENTA CONVENCIONAL.....	47
FIGURA 35 - GRÁFICOS CARGA AXIAL X TEMPO DA FERRAMENTA HEXAGONAL.....	47
FIGURA 36 - GRÁFICOS DE TEMPERATURA X TEMPO DAS AMOSTRAS A) 4-C4; B) 4-H4; C) 4-C0; .....	48



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ELEMENTOS DE LIGA PRESENTES.....	23
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO AA6060.....	23
TABELA 3 - NOMENCLATURA DAS TÊMPERAS.....	24
TABELA 4 - NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS POR FERRAMENTA.....	32
TABELA 5 - ENSAIO DE CISALHAMENTO. ....	36
TABELA 6 - ÁREA ZM E ENSAIO DE CISALHAMENTO .....	46

## LISTA DE SIGLAS

AA - Aluminum association  
CP - Corpo de prova  
Ferramenta C  
Ferramenta H  
FSSW - Solda por ponto de ficção e mistura mecânica  
FSW - Solda por ficção e mistura mecânica  
ISO - *International Organization for Standardization*  
NBR – Norma técnica  
TP – Tempo de permanência  
VP – Velocidade de penetração  
VR – Velocidade de rotação  
ZM – Zona de mistura  
ZTA - Zona afetada pelo calor  
ZTMA - Zona termomecanicamente afetada

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Contextualização do tema e problema de pesquisa .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivos geral e específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Estrutura de organização do trabalho .....</b>	<b>16</b>
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Microestrutura no Processo FSSW .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Velocidade de Rotação da Ferramenta no Processo FSSW .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 Tempo de Permanência da Ferramenta no Processo FSSW .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Liga de Alumínio 6060T5.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6 Influência da Geometria da Ferramenta no Processo FSSW.....</b>	<b>24</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Material de pesquisa.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Ferramenta de soldagem .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Parâmetros de soldagem .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.1 Nomenclatura das amostras .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Monitoramento do processo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.5 Ensaio de cisalhamento .....</b>	<b>33</b>
<b>3.6 Ensaio de microdureza.....</b>	<b>33</b>

<b>3.7 Análise metalográfica.....</b>	<b>34</b>
<b>3.6 Micrografia .....</b>	<b>35</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Ensaio de cisalhamento .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2 Força axial de soldagem .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Ensaio de microdureza.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Macrografia .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5 Micrografia .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6 Discussão dos resultados .....</b>	<b>45</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE I .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE II .....</b>	<b>57</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados a contextualização do tema, o problema de pesquisa, a delimitação do tema estudado, os objetivos geral e específicos, a justificativa da pesquisa e a estrutura de organização do projeto de trabalho de conclusão de curso.

Como motivação para elaboração da pesquisa, destaca-se a utilização e benefícios que podem ser promovidos pela soldagem de fricção por ponto, que é um processo de soldagem relativamente novo e alternativo para a indústria. Com isso, propõe-se que esta pesquisa tenha um impacto positivo no meio acadêmico e industrial. Ainda, espera-se que após sua conclusão, seja possível dar continuidade e aperfeiçoar os processos e resultados que aqui serão desenvolvidos.

## 1.1 Contextualização do tema e problema de pesquisa

A soldagem de fricção por ponto foi relatada pela primeira vez em 2001 (TSUNG-YU PAN, 2007), foi desenvolvida pela Mazda Motor Corporation e Kawasaki Heavy Industries, como uma ramificação de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) (S. BABU *et al*, 2013). A indústria no ramo automobilístico, com o interesse em reduzir custos de energia, focou no uso de ligas leves na produção, para a fabricação de seus produtos, com o intuito de aumentar a eficiência do combustível e melhorar o desempenho (H.BADARINARAYAN *et al*,2009).

Uma das ligas leves mais utilizadas é a liga de alumínio, devido à sua boa relação resistência/peso e boa resistência à corrosão. No entanto, a união do alumínio ainda é um grande desafio. O processo de união por ponto mais popular e comum utilizado ainda é o de soldagem a ponto por resistência (RSW), que consiste em um processo tradicional de soldagem por fusão. No RSW as ligas ficam suscetíveis a porosidades e trincas a quente durante o processo, e a vida útil não é tão boa quanto a dos os aços nesse mesmo processo (JU-RI KIM *et al*, 2017).

O processo FSSW surgiu no ramo automotivo com o intuito de ser uma forma alternativa de soldagem em ligas leves, para minimizar ou mesmo evitar os problemas que ocorrem na união de ligas de alumínio por técnicas convencionais.

Entretanto, a otimização do processo FSSW pode ser difícil, pois a geração de calor, a plastificação do material, a geometria da solda e as propriedades mecânicas resultantes das juntas FSSW são fortemente afetadas por vários parâmetros do processo, incluindo velocidade de rotação da ferramenta, geometria da ferramenta, profundidade de penetração e tempo de permanência (JU-RI KIM *et al*, 2017).

Como tema deste trabalho, foi desenvolvido um estudo e análise de como a geometria da ferramenta influencia no resultado do processo FSSW. O estudo teve como parâmetros de análise o tempo de permanência. Como delimitação do tema foi utilizada uma ferramenta com geometria convencional e outra com geometria hexagonal para comparação. Também foi investigado o parâmetro tempo de permanência.

O questionamento que se faz é: Como a geometria hexagonal da ferramenta influenciará nos parâmetros delimitados pela pesquisa em comparação com uma ferramenta convencional?

## **1.2 Objetivos geral e específicos**

O objetivo geral deste trabalho é investigar o efeito da geometria do pino da ferramenta no processo de soldagem FSSW em liga de alumínio.

Os seguintes objetivos específicos foram elencados de forma a avaliar o efeito da geometria hexagonal do pino em comparação a um pino “convencional” (cônico e liso):

- 1) analisar a influência no parâmetro de soldagem *tempo de permanência*;
- 2) caracterizar o efeito sobre a resistência ao cisalhamento das soldas;
- 3) caracterizar o efeito sobre o perfil de microdureza;
- 4) analisar a macroestrutura e microestrutura na busca de características que auxiliem na compreensão dos demais resultados em termos metalúrgicos.

## **1.3 Justificativa**

Como justificativa de elaboração deste trabalho, destaca-se a importância de descobrir como certos parâmetros interveem nas propriedades mecânicas da junta soldada, já que como mencionado anteriormente, a otimização desse processo

ainda é um desafio. Assim, este trabalho tem a finalidade de contribuir com o conhecimento sobre o processo FSSW, para ajudar a evitar certos problemas que podem acontecer durante o processo, devido à pouca informação sobre a reação das ligas em certos tipos de parâmetros. Ainda, este trabalho poderá servir como base para próximos estudos relacionados ao processo FSSW, logo sendo possível obter mais conhecimento e melhorar o processo.

### **1.5 Estrutura de organização do trabalho**

O presente trabalho foi desenvolvido em cinco capítulos: introdução, revisão de literatura, metodologia, resultados e discussões, conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No primeiro capítulo, foram abordados a contextualização do tema proposto para execução deste trabalho, a apresentação do problema de pesquisa e dos objetivos geral e específicos, além da justificativa para elaboração do trabalho.

No segundo capítulo, são apresentados os conceitos gerais necessários para o desenvolvimento do trabalho, através da revisão da literatura. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa, juntamente com todos os procedimentos executados para a obtenção dos resultados.

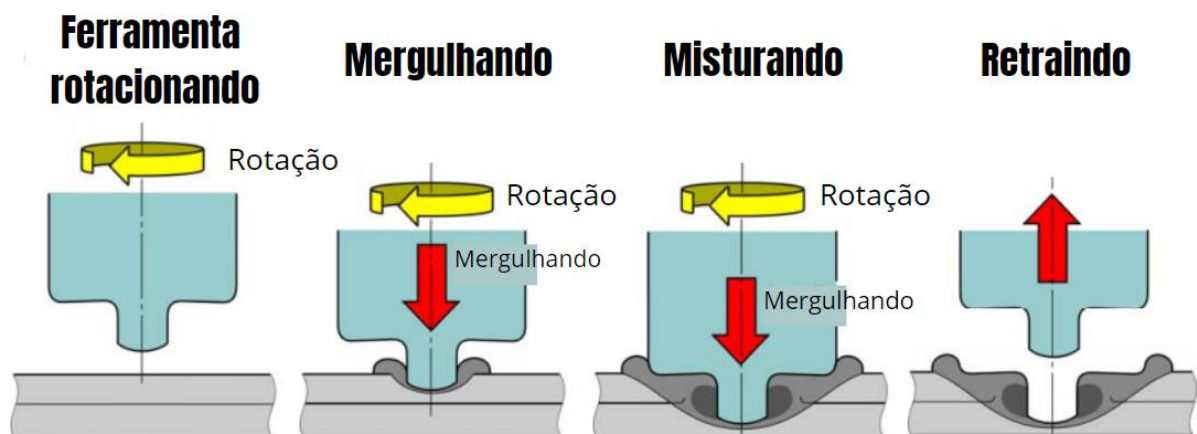
No quarto capítulo é apresentado os resultados de todos os métodos utilizados, discutido e analisado, e posteriormente no capítulo seis é apresentado as conclusões dos resultados, e por fim, sugestões de trabalhos futuros para dar continuidade ao estudo da soldagem FSSW.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica

O FSSW é um processo de soldagem, em que uma ferramenta rotativa, de geometria cilíndrica, composta por um ombro e um pino mergulha nas peças de trabalho a serem unidas. A ferramenta não é consumível e o processo destina-se primariamente para união de chapas na forma juntas sobrepostas. A figura 1 ilustra o processo: na medida em que a ferramenta rotativa é forçada contra as chapas em sobreposição, calor é gerado por meio do atrito (na interface ferramenta/chapas) e da deformação plástica das chapas. O pino promove um fluxo plástico de material, e o ombro da ferramenta, ao atingir a superfície da chapa, intensifica ainda mais o calor gerado, o fluxo de material é restringido para a região da junta e promove um recalque que consolida a junta. Ao atingir a profundidade de mergulho desejada, a ferramenta rotativa pode ser mantida nessa posição por um tempo predeterminado, chamado de tempo de permanência.

Figura 1- Desenho ilustrativo do processo FSSW.

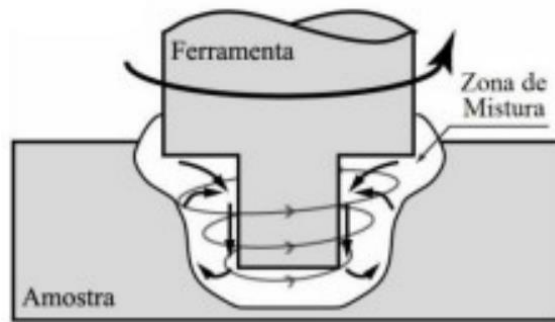


Fonte: adaptado de TSUNG-YU PAN (2007).

Existem dois tipos de movimentos que o material experimenta na fase de mistura, são eles o movimento do material amolecido na direção axial e movimento do material suavizado na direção de rotação, como mostra a figura 2. Após isso, a ferramenta rotativa é retraída ao final do tempo de permanência que foi estabelecido.



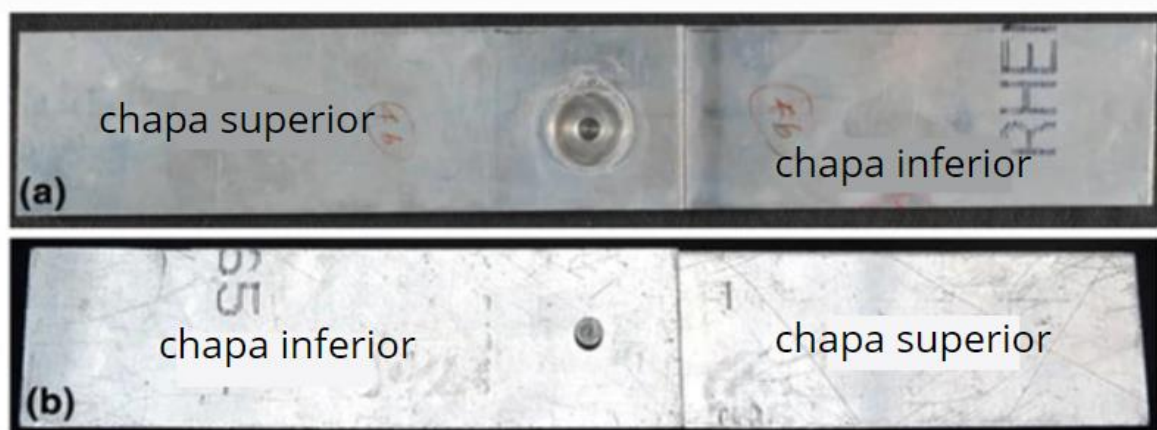
Figura 2- Fluxo de material.



Fonte: BARBOSA (2021)

Tem-se, então, uma união no estado sólido, formada na interface entre as chapas superior e inferior. No final o processo deixa um furo cego e uma marca na superfície superior no formato negativo da ferramenta (ombro e pino), como exemplificado na figura 3. A ausência de fusão no material durante a soldagem tende a proporcionar melhores propriedades em comparação com o processo de soldagem convencional (TSUNG-YU PAN, 2007.) (SHIGEKI *et al*, 2010) (MELIKE ŞAŞMAZ, *et al*, 2017).

Figura 3- Imagem de uma junta típica obtida por FSSW.



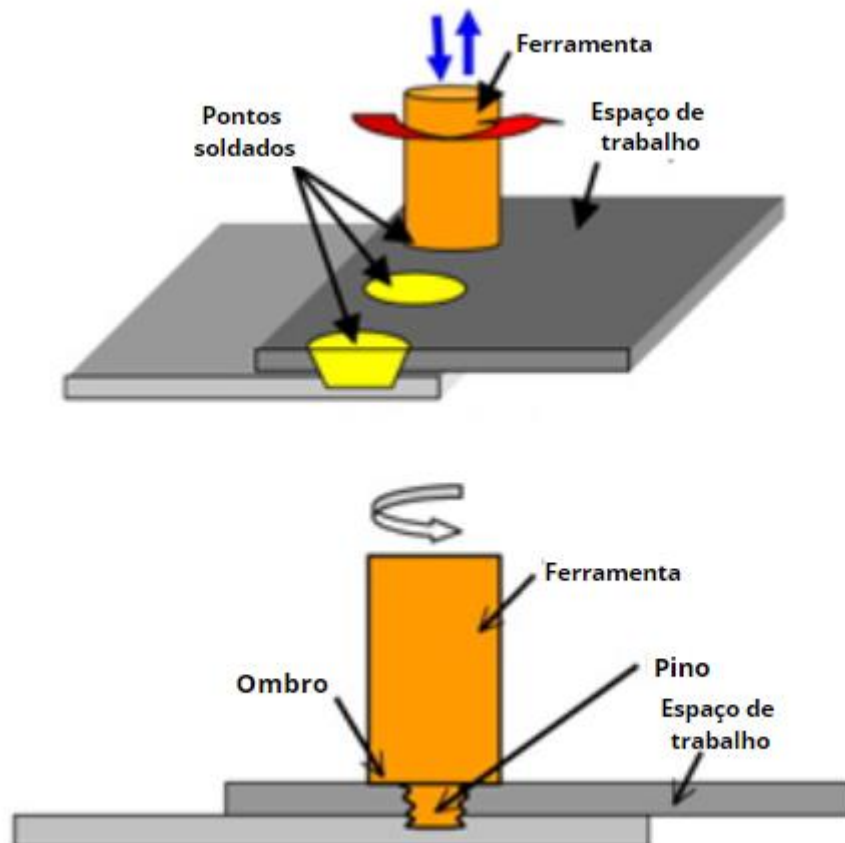
Fonte: adaptado de BABU (2012).

Segundo H. Badarinarayan *et al* (2009) tem sido relatado que a resistência das soldas ponto por fricção e mistura mecânica dependem principalmente do tamanho da região de solda, que está mais intimamente relacionada aos parâmetros do processo, como o tempo de permanência, força aplicada e velocidade de rotação. Para Zhaohua Zhang *et al* (2011) quando a geometria da ferramenta se mantém

constante, são a velocidade de rotação e tempo de permanência os parâmetros mais importantes.

A ferramenta tem duas partes distintas, o ombro e o pino, como mostra a figura 4. O ombro gera a maior parte do calor de fricção e deformação, e o pino auxilia no fluxo de material entre as peças (SHIGEKI *et al*, 2010).

Figura 4- Desenho ilustrativo do pino e ombro da ferramenta.



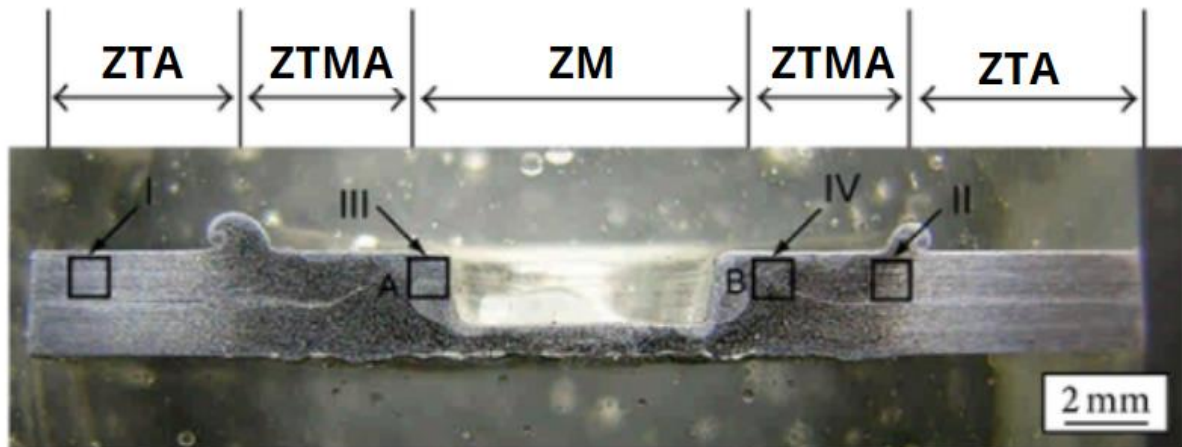
Fonte: adaptado de SHIGEKI *et al*, (2010).

Muitos pesquisadores mostram grande interesse na soldagem ponto por fricção e mistura mecânica devido as suas vantagens, como excelentes propriedades mecânicas, pouca deformação de soldagem, facilidade de manuseio, e baixo custo, devido ao pouco consumo de energia, longa vida útil da ferramenta e investimento reduzido em equipamentos e materiais adicionais (ZHAOHUA ZHANG *et al*, 2011) (TSUNG-YU PAN, 2007.).

## 2.2 Microestrutura no Processo FSSW

A macrografia da junta produzida pelo processo FSSW, que é constituída por três regiões distintas: a zona de mistura (ZM), a zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e a zona afetada pelo calor (ZTA), como é exemplificado na figura 5 (MELIKE ŞAŞMAZ, *et al*, 2017).

Figura 5- Zonas afetadas em uma junta FSSW.



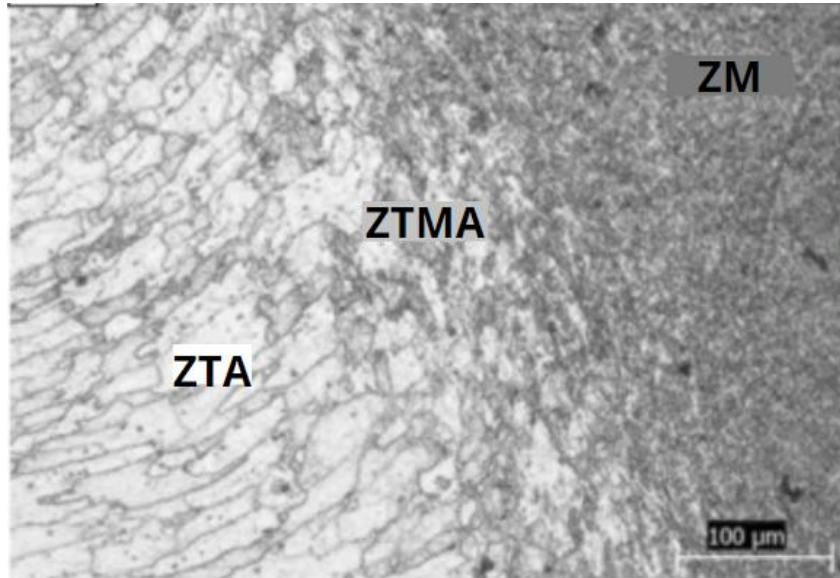
Fonte: adaptado de X. W. YANG *et al*, 2014.

De acordo com YANG *et al*, (2014), a aparência macroscópica da junta FSSW é influenciada pela temperatura e pela deformação plástica do material. Além disso, os parâmetros de soldagem (principalmente velocidade de rotação, tempo de permanência e profundidade de penetração) determinam o calor de atrito e deformação plástica durante a soldagem. Assim, a aparência macroscópica muda com a mudança dos parâmetros de soldagem, e conseqüentemente a microestrutura também.

A ZM, que está mais próxima do pino da ferramenta, inclui grãos equiaxiais finos devido à recristalização dinâmica. O tamanho dos grãos podem aumentar com o aumento da velocidade de rotação, e conseqüentemente a zona de mistura cresce. A resistência à tração melhora com o tamanho ZM devido ao comprimento de ligação mais longo. Próximo à ZM está a ZTMA, onde a temperatura e a deformação plástica não são suficientes para que ocorra recristalização dinâmica, resultando em grãos altamente deformados. A ZTA caracteriza uma zona onde o material sofreu

apenas efeito do cíclico térmico, sem deformação plástica, onde os grãos tendem a ser mais grossos, figura 6. (CHAITANYA SHARMA *et al*, 2021).

Figura 6- Microestrutura na região soldada por FSSW.



Fonte: adaptado de CHAITANYA SHARMA *et al*, (2021)

### 2.3 Velocidade de Rotação da Ferramenta no Processo FSSW

A mistura do material em torno do pino está fortemente vinculada à rotação da ferramenta. Rotações elevadas tendem a produzir um revolvimento mais intenso de material, devido a elevação da temperatura. Entretanto, existe um platô para o aumento da temperatura em função da taxa crescente de rotação, dado que o coeficiente de atrito se altera com o aquecimento do material (TRELLES, 2017).

De acordo com Suryanarayanan *et al* (2021), que realizaram uma pesquisa sobre a velocidade de rotação no processo FSSW, foi destacado que a combinação de níveis mais baixos de velocidade rotacional e tempos de permanência mais altos era fundamental para obter uma mistura de material suficiente na interface de solda para obter resistência mecânica superior.

## **2.4 Tempo de Permanência da Ferramenta no Processo FSSW**

De acordo com Sachin Jambhale, *et al* (2015) o tempo de permanência é o parâmetro de soldagem mais dominante para resistência da solda seguida pela velocidade de rotação. Para tempos de permanência mais longos espera-se uma maior geração de calor durante o processo, pois há mais tempo de atrito no material. Entretanto, também há relatos de que os usos de tempos de permanência mais elevados resultaram na formação de defeitos de ligação *kissing* na interface da solda, que prejudica as propriedades de fadiga das juntas de solda. (R.SURYANARAYANAN *et al*, 2021)

## **2.5 Liga de Alumínio 6060T5**

A liga de alumínio tem sido um dos materiais leves mais promissores devido à uma série de características como baixa densidade, resistência a corrosão, resistência específica, resistência ao impacto e alta reciclagem (ZHAOHUA ZHANG *et al*, 2011).

As ligas trabalhadas mecanicamente, seguem a regulamentação da norma NBR ISO 209:2010, para serem classificadas seguindo a nomenclatura de séries de quatro dígitos. O primeiro dígito refere-se ao elemento de liga presente na liga, como mostra a tabela 1, já o segundo dígito informa se ocorreram modificações nos níveis de impurezas, se igual a zero, significa que as impurezas ali concentradas são provenientes do processo de fabricação, se diferente de zero, determina o controle especial na concentração destas impurezas. Por fim, terceiro e quarto dígitos, o percentual de alumínio além dos 99% existentes. Portanto, a liga alumínio 6060 possui magnésio e silício em sua composição (6xxx), contém impurezas do processo de fabricação (x0xx), e possuem percentual de 99,60% de alumínio em sua composição, os outros 0,40% são compostos por outros elementos. (CAPELARI, 2006).

Tabela 1- elementos de liga presentes.

Série	Principal elemento de liga
1xxx	Alumínio $\geq 99\%$
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Série não utilizada

Fonte: BARBOSA (2021)

A presença de silicato de magnésio ( $Mg_2Si$ ) na proporção necessária provê o aumento da resistência mecânica. As ligas desta série possuem resistência à corrosão, boa conformabilidade e soldabilidade e são de fácil usinagem. (CERVEIRA, 2008)

Tabela 2 - Composição AA6060.

Concentração dos elementos (% em peso)				
Si	Mg	Fe	Mn	Ti
0,47	0,41	0,16	0,06	0,01

Fonte: AITA (2021)

A têmpera consiste no resfriamento brusco após a etapa de solubilização, visando formação de soluções sólidas supersaturadas. A letra T é seguida por um ou dois dígitos, que descrevem a sequência de processos realizados, como mostra a tabela 3. (Davis 2009)

Tabela 3 - nomenclatura das têmperas.

<b>Têmperas</b>	<b>Procedimento</b>
T1	Resfriamento após conformação seguido de envelhecimento natural.
T2	Resfriamento após conformação seguido de trabalho a frio e envelhecimento natural.
T3	Solubilização, resfriamento rápido, trabalho a frio e envelhecimento natural.
T4	Solubilização, resfriamento rápido e envelhecimento natural.
T5	Resfriamento após conformação seguido de envelhecimento artificial.
T6	Solubilização, resfriamento rápido e envelhecimento artificial.
T7	Solubilização, resfriamento rápido seguido de superenvelhecimento artificial.
T8	Resfriamento após solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial.
T9	Idêntico a T3 porém, com envelhecimento artificial.
T10	Idêntico a T2 porém, com envelhecimento artificial.

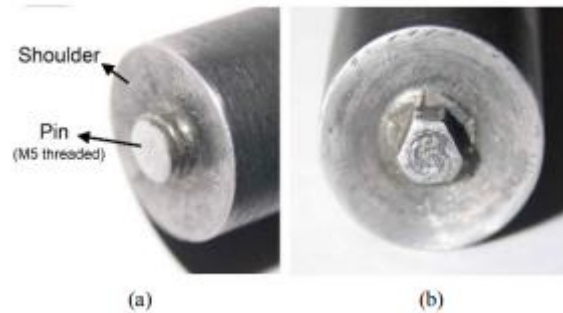
Fonte: Alcan (1993).

## 2.6 Influência da Geometria da Ferramenta no Processo FSSW

A ferramenta impacta a forma e outros aspectos das juntas soldadas, transferindo parâmetros geométricos, como ângulos de pinos e ressaltos. Dependendo do desenho do ombro, a superfície superior da articulação pode ser plana ou inclinada. Da mesma forma, dependendo do tipo de pino, o orifício de saída pode ser de formatos diversos. A inserção da ferramenta expelle o material da chapa e o deposita nas bordas do ombro, produzindo um anel externo. (CHAITANYA SHARMA *et al*, 2021).

No estudo de Moslem Paidar *et al* (2015), foram mostradas as diferenças que poderiam ocorrer na soldagem ponto utilizando duas ferramentas com geometria diferente, uma com geometria triangular e a outra cilíndrica, como mostra a figura 7, todos os parâmetros utilizados no estudo foram iguais. Pôde-se concluir nesse trabalho que, em alta velocidade de rotação e profundidade de mergulho, o modo de fratura foi independente da geometria do pino, e também que a geometria do pino afeta significativamente a forma do gancho e a forma da ZM, particularmente em condições de baixa temperatura.

Figura 7 - Imagens das ferramentas utilizadas.



Fonte: MOSLEM PAIDAR *et al* (2015).

Na pesquisa de Hande Güler (2014), usou-se o processo de FSSW em ligas de AA 5754-H1111, e foram comparadas ferramentas com pinos circulares (FSSW-C) e cônicos (FSSW-T), figura 8, com os mesmos parâmetros de execução. Apresentaram maiores valores de carga de cisalhamento as amostras soldadas com a ferramenta FSSW-C, em comparação com a ferramenta FSSW-T, devido a um melhor procedimento de agitação. Por fim, não houve efeitos perceptíveis das geometrias da ferramenta e dos parâmetros de soldagem que afetam a dureza do material mencionado.

Figura 8: Imagem das ferramentas utilizadas por Hande Güler.



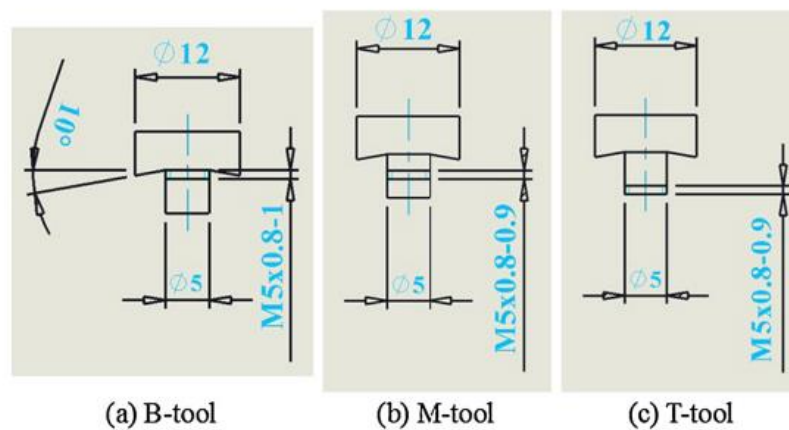
Fonte: HANDE GULER (2014)

No trabalho de Yuan-Ching Lin *et al* (2015), foram usadas três ferramentas semelhantes, tendo como diferença o local de rosqueamento nos pinos, como mostra a figura 9. De acordo com os resultados experimentais, a altura da ZM nas



soldas mudou com os locais de rosqueamento nos pinos cilíndricos, demonstrando assim um método eficaz para controlar o fluxo de materiais. Também pode-se notar que durante um período de mergulho, as soldas criadas pelas várias ferramentas de rosqueamento resultaram em vários graus de mistura de materiais. A junta FSSW criada pela ferramenta B (com a rosca posicionada no meio do pino) a 1800 rpm revelou um fenômeno de mistura em comparação com o conjunto criado pelas ferramentas M e T na mesma velocidade de rotação.

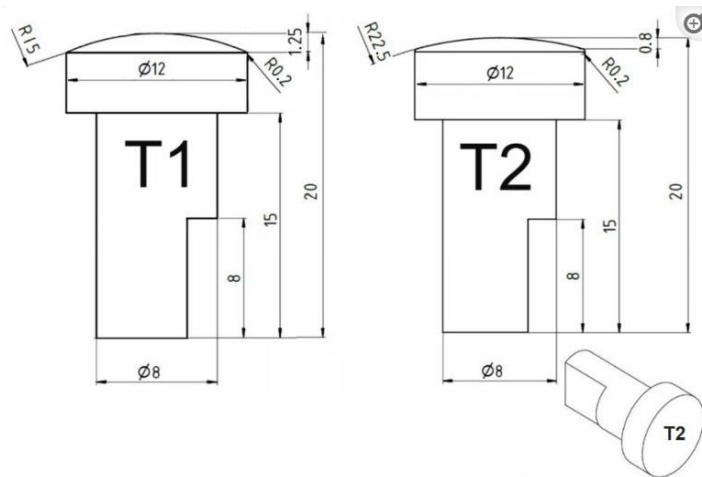
Figura 9: Imagem ilustrativa das ferramentas.



Fonte: YUAN-CHING LIN *et al* (2015)

No estudo de Danka Labus Zlatanovic *et al* (2021), foram utilizados dois tipos de ferramentas (T1 e T2) com raios diferentes, mostradas na figura 10. Pôde-se entender com esse estudo que não houve diferenças notáveis entre as duas ferramentas. As soldas obtidas de uma ferramenta em particular produziram uma zona de agitação mais ampla em comparação com as obtidas com a outra ferramenta.

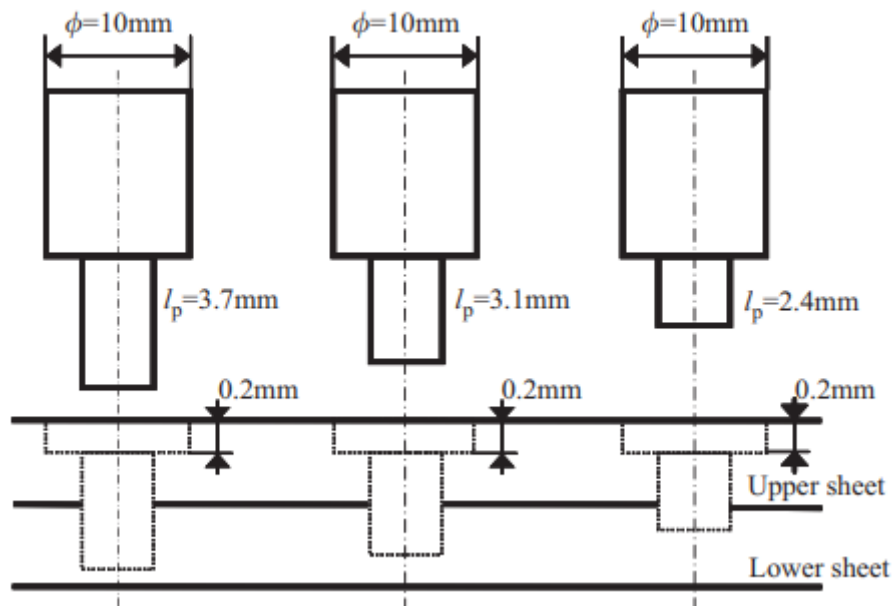
Figura 10: Ilustração da ferramenta.



Fonte: Danka Labus Zlatanovic *et al* (2021).

No estudo de Yasunari Tozaki *et al* (2007) foram utilizadas três ferramentas de geometrias diferentes, esquematizadas na figura 11. As ferramentas possuem três diferentes comprimentos de pino sendo de 3,7, 3,1 e 2,4 mm. A resistência ao cisalhamento aumentou com o comprimento do pino, enquanto a resistência à tração não foi afetada.

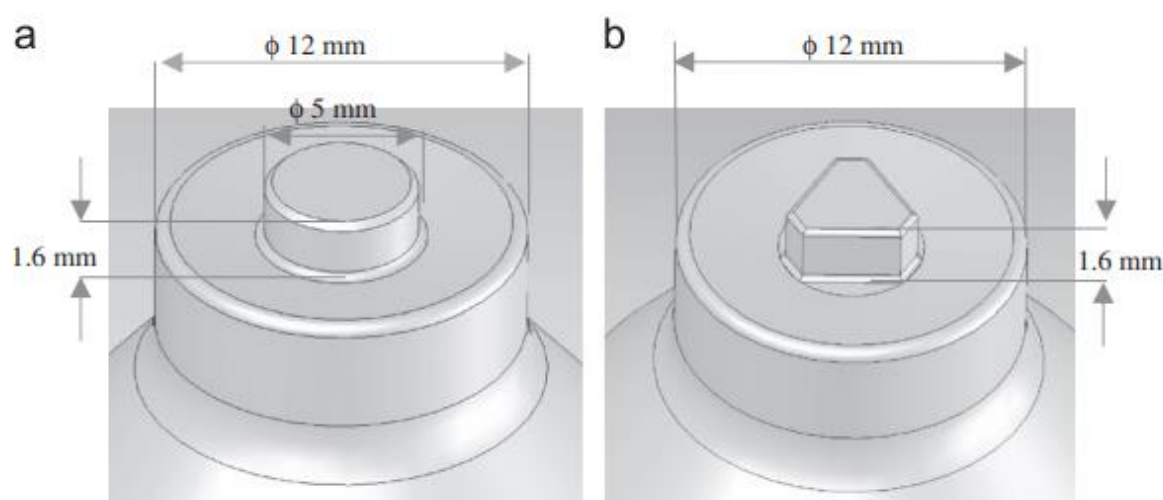
Figura 11: Imagem ilustrativa das ferramentas.



Fonte: Yasunari Tozaki *et al* (2007).

Por fim, H. Badarinarayan *et al* (2008), executou um trabalho referente a duas geometrias de ferramentas, uma com o pino cilíndrico e outra com o pino triangular (figura 12). Para simplicidade de nomenclatura, soldas a ponto feitas com cilindros e os pinos triangulares são designados como FSSW-C e FSSW-T, respectivamente. Devido à rotação assimétrica do pino de formato triangular que aumenta muito a deformação do material, uma estrutura de grão mais fino é formada nas proximidades do orifício de solda em comparação com o pino cilíndrico. Com um aumento adicional na carga, a solda FSSW-C sofre colapso plástico próximo ao fundo da solda em modo de cisalhamento, enquanto a solda FSSW-T fratura pela propagação de trincas através da zona de agitação sob tensão. Por fim, a resistência da solda é determinada pelo modo de falha e pela resistência relacionada à microestrutura do material. A resistência à tensão cruzada das soldas feitas com o pino triangular é duas vezes maior que a das soldas feitas com o pino cilíndrico.

Figura 12: Imagem ilustrativa das ferramentas.



Fonte: H. Badarinarayan *et al* (2008)

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Material de pesquisa**

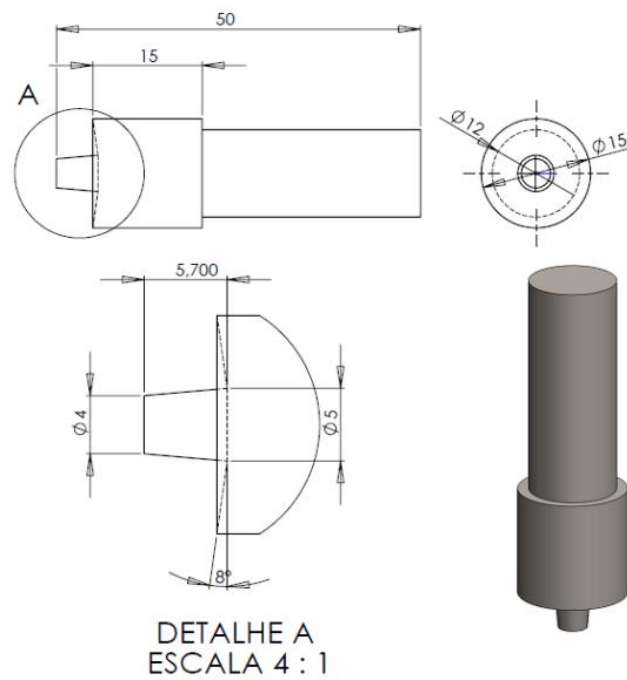
Neste trabalho foi feito um estudo do efeito da geometria do pino da ferramenta de soldagem no processo FSSW aplicado à liga 6060-T5 (ver Tabela 2). Um total de 24 amostras foram produzidas na forma de juntas sobrepostas unidas por ponto pelo processo de soldagem FSSW. Chapas de 25 mm de largura e 3 mm de espessura foram utilizadas para a produção de corpos de prova (CP) na forma de juntas sobrepostas.

### **3.2 Ferramenta de soldagem**

As soldagens foram feitas com duas ferramentas diferentes para a análise comparativa entre elas, uma convencional cônica (C) e a outra com geometria hexagonal (H), ambas com o mesmo ângulo de conicidade como mostra a figura 14.

As ferramentas de soldagem foram feitas de aço H13, tratadas termicamente com têmpera, a 1100 °C, e duplo revenido, a 470 °C por 10 min. A Figura 13 mostra um desenho técnico da ferramenta convencional. O ombro de ambas as ferramentas possui concavidade de 8 graus na sua base. O pino possui comprimento de 5,7 mm, e os diâmetros de base e ponta são de 5 e 4 mm, respectivamente. O ombro da ferramenta tem diâmetro de 15 mm.

Figura 13: Desenho técnico da ferramenta convencional.



Fonte: o autor.

Figura 14: Ferramentas investigadas: a) pino cônico convencional e b) pino sextavado.



Fonte: o autor.

### 3.3 Parâmetros de soldagem

As soldas foram realizadas em um centro de usinagem Romi D800, mostrado na figura 15. Com base em trabalhos anteriores, os parâmetros definidos neste

estudo foram velocidade de rotação (VR) constante de 2000 rpm, e velocidade de penetração (VP) constante de 200 mm/min, para todas as amostras. A profundidade de penetração do pino e do ombro foram fixados em 5,7 e 0,3mm, respectivamente, totalizando 6 mm. Como variável de estudo foi adotado o tempo de permanência (TP) onde foram estabelecidos os valores de 0, 2 e 4 s.

Figura 15 - Romi D800.



Fonte: o autor.

### 3.3.1 Nomenclatura das amostras

A nomenclatura das amostras convencionou-se utilizando um número inicial de 1 até 4, seguido da letra C, para a ferramenta convencional, ou H, para a ferramenta hexagonal, e posteriormente o número 4, 2 ou 0, que são os tempos de permanência, como mostrado na tabela 4.

Tabela 4 - Nomenclatura das amostras por ferramenta.

Amostra	TP(s)	Ferramenta convencional-C	Ferramenta hexagonal-H
1	0	1-C0	1-H0
2		2-C0	2-H0
3		3-C0	3-H0
4		4-C0	4-H0
1	2	1-C2	1-H2
2		2-C2	2-H2
3		3-C2	3-H2
4		4-C2	4-H2
1	4	1-C4	1-H4
2		2-C4	2-H4
3		3-C4	3-H4
4		4-C4	4-H4

Fonte: o autor.

### 3.4 Monitoramento do processo

O processo de soldagem das amostras foi monitorado utilizando um condicionador de sinais modelo Spider 8 da HBM, mostrado na figura 16, para avaliar os ciclos de temperatura e força axial. O Spider foi conectado a um computador, e utilizou-se o software CatMan para configuração do sistema e aquisição dos dados. Para a medição da força axial, utilizou-se uma célula de carga de 100 kN e um dispositivo para conectar o suporte à célula de carga. Dois termopares do tipo J foram utilizados para a medição da temperatura nas linhas do pino e do ombro da ferramenta durante o processo, ambos posicionados na parte inferior do dispositivo de soldagem.

Figura 16 - Spider 8 da HBM.



Fonte: o autor.

### 3.5 Ensaio de cisalhamento

O ensaio mecânico de cisalhamento foi realizado na máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X 5kN, figura 17 a), utilizando-se uma célula de carga de 5kN. A velocidade do ensaio foi de 0,5 mm/min. A figura 17 b) mostra em detalhe um ensaio de cisalhamento em curso, onde pode-se ver a utilização de calços nas pontas dos corpos de prova de modo a neutralizar carregamentos torcionais na amostra.

Figura 17 - a) Shimadzu AGS-X 5kN. B) Representação do ensaio.



Fonte: o autor.

### 3.6 Ensaio de microdureza

O perfil de microdureza foi medido de modo a mapear as diferentes zonas da solda nas amostras. Realizou-se ensaio de microdureza Vickers com carga de 500g em um microdurômetro modelo Buehler Micromet 6010, figura 18. As indentações foram realizadas com espaçamento de 0,7 mm e tempo de aplicação de carga de 10s. Os perfis de microdureza foram medidos à meia espessura das chapas superior e inferior como mostrado na figura 19.

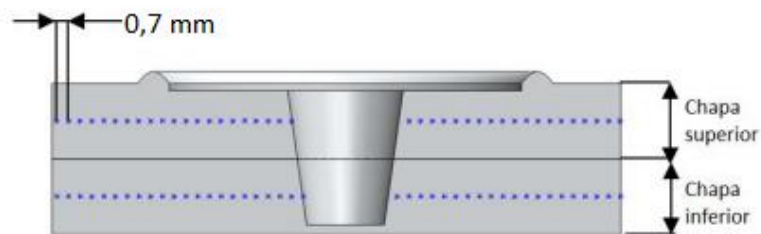


Figura 18 - microdurômetro modelo Buehler Micromet 6010



Fonte: o autor.

Figura 19 - imagem ilustrativa do ensaio de microdureza.



Fonte: o autor.

### 3.7 Análise metalográfica

Para a macrografia foram separadas amostras de cada tempo de permanência para cada tipo de ferramenta. O seccionamento das amostras foi realizado com auxílio de um disco abrasivo para corte de precisão em uma máquina Buehler Isomet 4000, mostrado na figura 20 a). As amostras foram cortadas no centro do botão de solda, como observa-se na figura 20 b). A preparação das amostras seguiu a técnica metalográfica padrão de embutimento, lixamento e polimento. Após o polimento as amostras foram atacadas com reagente de seguinte composição: 100mL de HCl, 100mL de HNO<sub>3</sub>, 25mL de HF e 100mL de H<sub>2</sub>O para revelação de aspectos geométricos da junta soldada e observação da macroestrutura. As imagens das macrografias foram feitas por uma câmera com resolução de 16 MP.

Figura 20 - a) Buehler Isomet 4000. b) Botão de solda e corpo de prova



Fonte: o autor.

### 3.6 Micrografia

Para análise da condição da interface entre as chapas superior e inferior foram feitas micrografias das amostras na interface próximo ao centro da solda. Foi feita no microscópio óptico *Fortel/Kontrol* como mostra a figura 21.

Figura 21 - microscópio óptico.



Fonte: o autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 22 mostra o botão de solda resultante do processo de soldagem FSSW. No centro do botão observa-se o furo deixado pelo pino da ferramenta, que é característico do processo, e também a rebarba formada através do deslocamento de material para fora do botão de solda, pelo ombro da ferramenta.

Figura 22 - amostra soldada.



Fonte: o autor.

Durante a execução das soldagens, percebe-se que os processos realizados com a ferramenta hexagonal e sem tempo de permanência (TP = 0) não resultaram em união entre as chapas.

#### 4.1 Ensaio de cisalhamento

Nos ensaios de cisalhamento foi feita a medição da carga e do alongamento até a ruptura das amostras. Na tabela 5 estão indicadas as cargas máximas medidas durante os ensaios.

Tabela 5 - Ensaio de cisalhamento.

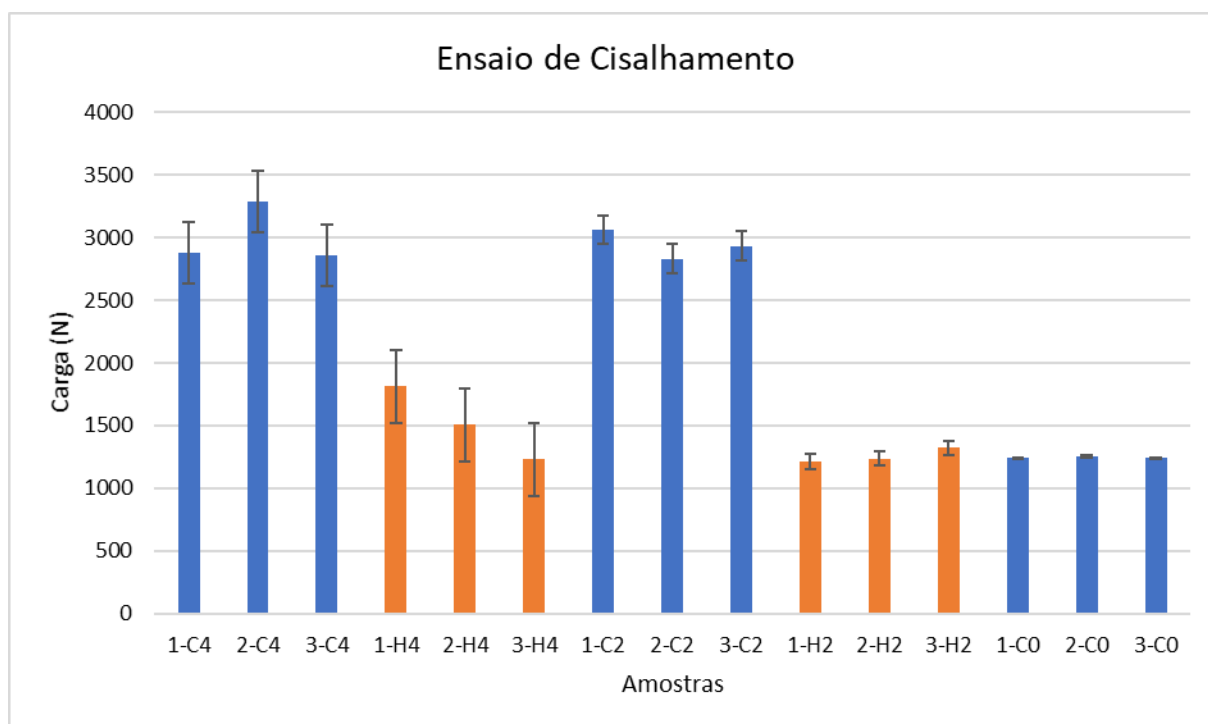
Ferramenta	TP (s)	Carga 1 (N)	Carga 2 (N)	Carga 3 (N)	Média (N)	Desvio Padrão (N)
Convencional	0	1238,95	1251,96	1238,95	1238,95	7,51
	2	3062,51	2828,58	2933,18	2941,42	117,18
	4	2879,19	3290,47	2859,66	2879,19	243,29
Hexagonal	0	-	-	-	-	-
	2	1212,92	1238,05	1321,73	1238,05	56,97
	4	1812,57	1508,88	1229,7	1508,88	291,52

Fonte: o autor.

Percebe-se que as soldagens feitas pela ferramenta hexagonal tiveram um desempenho inferior, se comparado com as soldas da ferramenta convencional. Pode-se notar, também, que a ferramenta C proporciona soldas mais resistentes nos TP de 2 e 4 s.

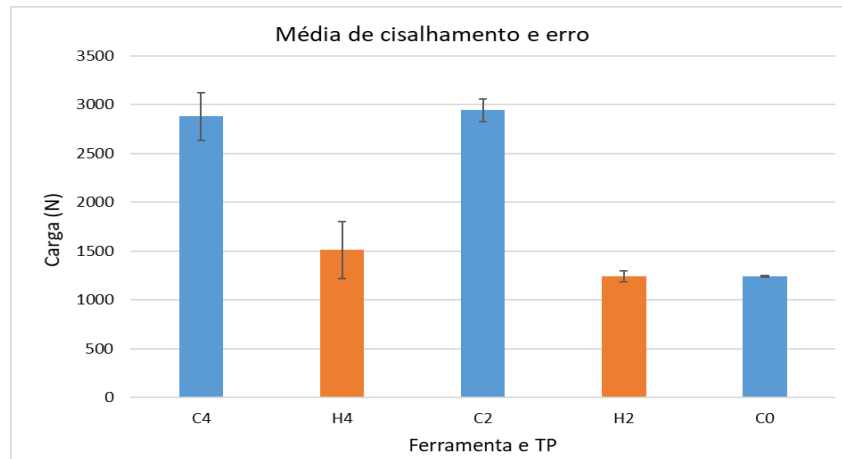
Os corpos de prova da ferramenta H tiveram resistência consideravelmente inferior aos produzidos com a ferramenta C, cerca de 1703,37 N a menos no TP de 2 s e 1370,31 N a menos no TP de 4 s, sendo 57,90% e 47,59% menor, respectivamente. Para melhor visualização dos resultados, na figura 23 tem-se gráfico de coluna das cargas máximas medidas nos ensaios de cisalhamento para cada amostra juntamente dos desvios em relação a média, e na figura 24 tem o gráfico com as médias de cada tempo de permanência com seu desvio padrão.

Figura 23 - Gráfico do ensaio de cisalhamento.



Fonte: o autor.

Figura 24 - Grafico média de cisalhamento e erro.

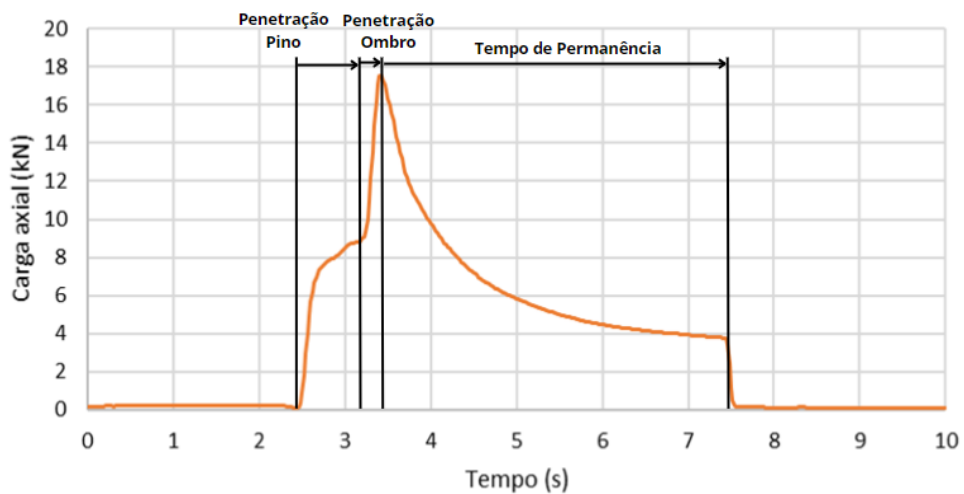


Fonte: o autor.

## 4.2 Força axial de soldagem

O monitoramento da força axial durante o processo de soldagem ajuda a detalhar o comportamento do material conforme a penetração da ferramenta ocorre. Na figura 25, pode-se observar o processo da ferramenta convencional com 4 s de permanência. Primeiramente a força axial aumenta com a penetração do pino. Com a penetração do ombro, devido a maior área de contato, a força axial aumenta até o seu valor máximo. Após atingir o valor máximo, a força axial diminui durante o tempo de permanência da ferramenta, e então cai para zero com a retirada da ferramenta.

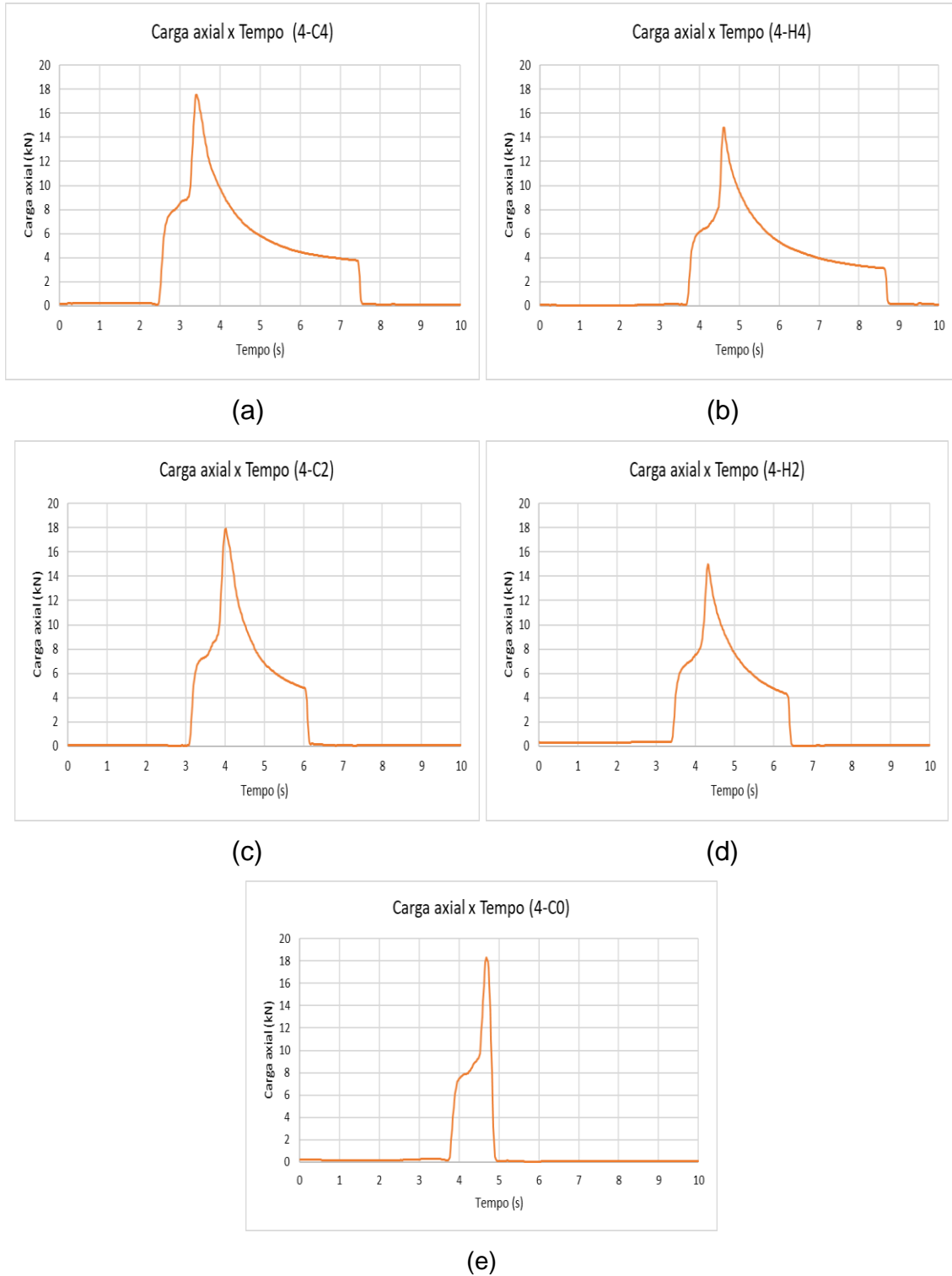
Figura 25 - Força axial x Tempo, ferramenta 4-C4.



Fonte: o autor.

A figura 26 mostra as curvas de carga axial x tempo dos processos de soldagem das amostras 4-C4, 4-H4, 4-C2, 4-H2 e 4-C0.

Figura 26 - Carga axial x Tempo

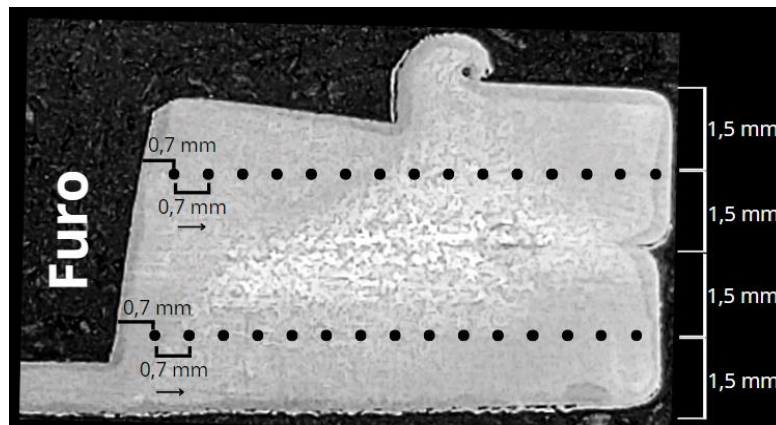


Fonte: o autor.

### 4.3 Ensaio de microdureza

A figura 27 mostra a macrografia da metade direita de uma amostra soldada após a preparação metalográfica. Também estão demarcados os pontos de indentação em que foram feitas as medições de microdureza, esses pontos possuem 0,7 mm de distância entre eles. As medições iniciam a partir do início do material, ou seja, a primeira medição inicia 0,7 mm de distância do furo, como ilustrado na figura 27.

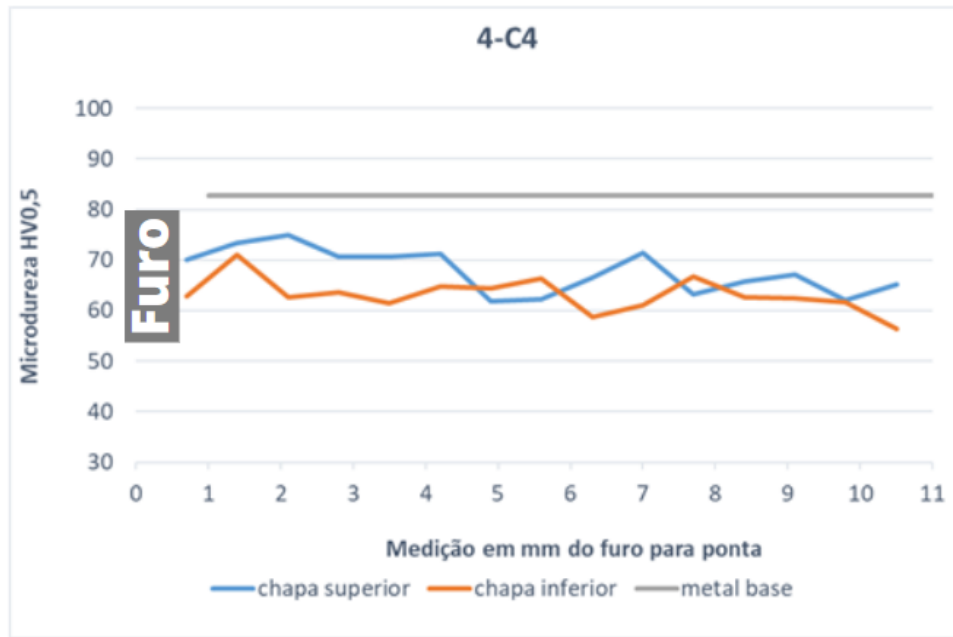
Figura 27 - Macrografia da seção direita de uma amostra pós preparação metalográfica mostrando as posições das indentações.



Fonte: o autor.

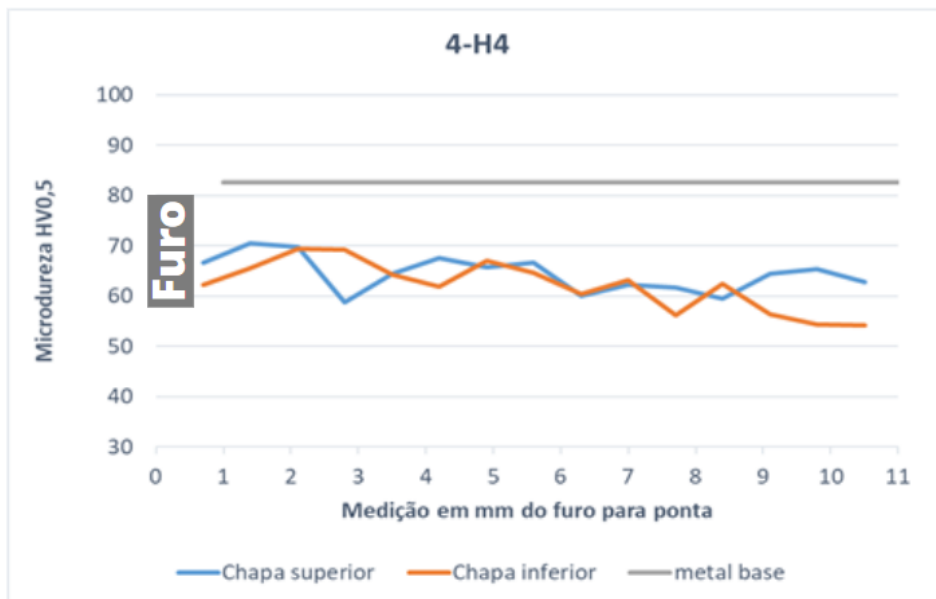
As figuras 28, 29 e 30 mostram os perfis de microdureza medidos nas amostras produzidas. Os perfis foram medidos na metade direita da espessura das chapas superior e inferior. Devido a simetria, os perfis são apresentados para apenas um dos lados da amostra.

Figura 28 – Perfil de microdureza da amostra 4-C4 – Convencional de 4 s.



Fonte: o autor.

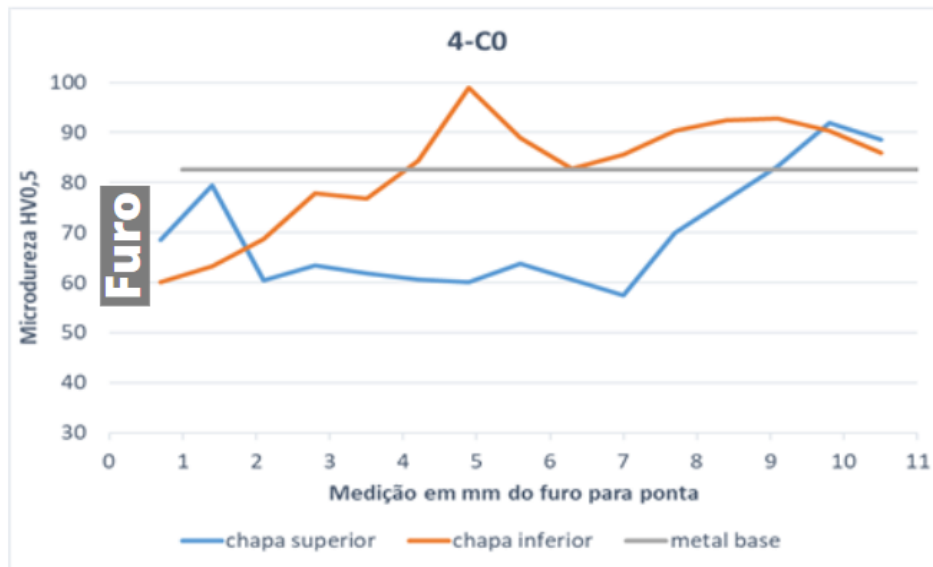
Figura 29- Perfil de microdureza da amostra 4-H4 – Hexagonal de 4 s.



Fonte: o autor.



Figura 30 - Perfil de microdureza da amostra 4-C0 – Convencional de 0 s.

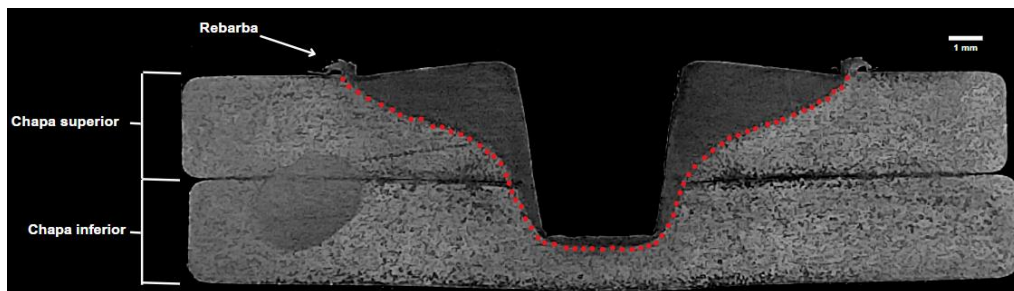


Fonte: o autor.

#### 4.4 Macrografia

A figura 31 mostra a macrografia da amostra 4-C0. O ataque químico realça com destaque a zona de mistura (ZM), que na figura 31 está delimitada pela linha tracejada, para melhor visualização.

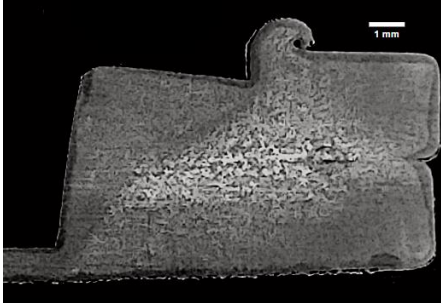

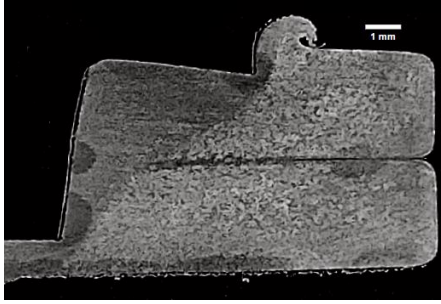
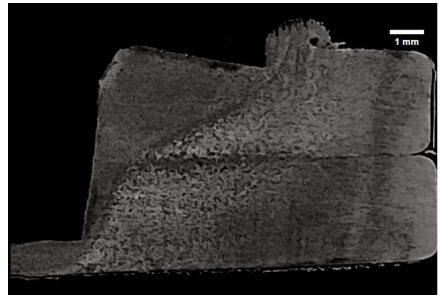
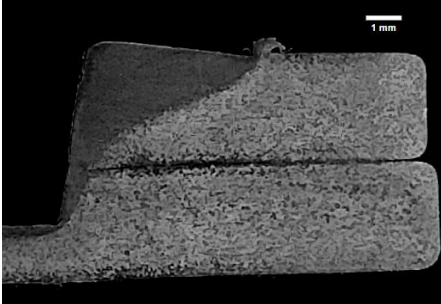
Figura 31 - imagem da amostra 4-C0.



Fonte: o autor.

Na figura 32 estão mostradas as macrografias das amostras com todos os tempos de permanência, para as duas ferramentas. Juntamente com as imagens está a área da ZM, que foi medida utilizando o *Software ImageJ*.

Figura 32 - Imagens macrograficas das amostras.

Ferramenta Convencional	Ferramenta Hexagonal
4-C4 (TP 4 s)	4-H4 (TP 4 s)
	
$A_{zm} = 30,46 \text{ mm}^2$	$A_{zm} = 28,09 \text{ mm}^2$
4-C2 (TP 2 s)	4-H2 (TP 2 s)
	
$A_{zm} = 28,65 \text{ mm}^2$	$A_{zm} = 26,51 \text{ mm}^2$
4-C0 (TP 0 s)	
	
$A_{zm} = 20,24 \text{ mm}^2$	

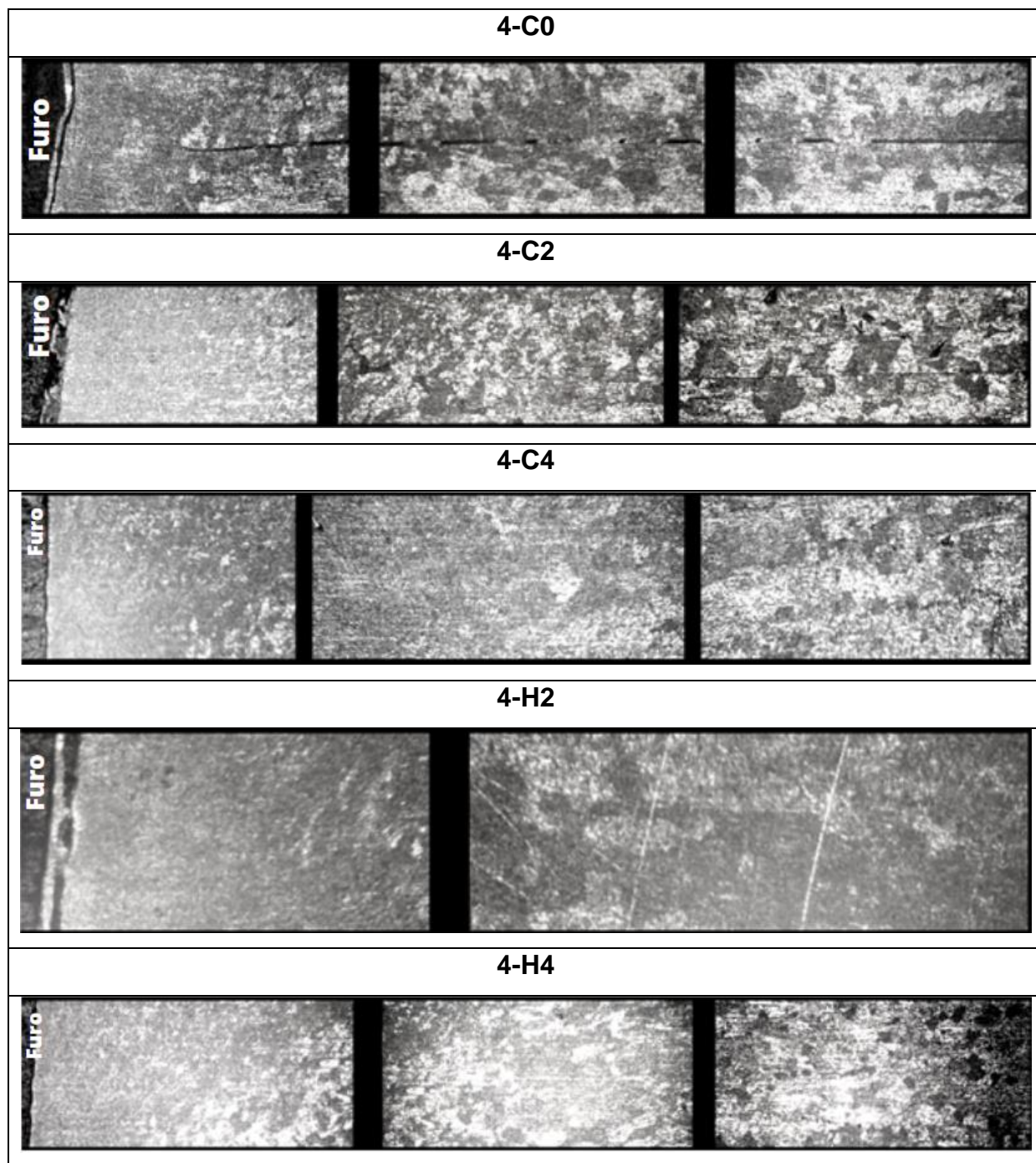
Fonte: o autor.

#### 4.5 Micrografia

A figura 33 mostra as micrografias das amostras 4-C4, 4-C2, 4-C0, 4-H4 e 4-H2. As imagens foram obtidas com microscopia ótica e aumento de 100x. As

micrografias foram tomadas à meia altura das juntas soldadas, junto à interface das chapas, a partir do centro da solda, fazendo-se três imagens para cada amostra.

Figura 33 - Imagens micrográficas das amostras.



Fonte: o autor.

#### 4.6 Discussão dos resultados

Os resultados do ensaio de cisalhamento mostram que aumentar o TP nem sempre faz aumentar a resistência ao cisalhamento. Com relação a ferramenta convencional, o melhor TP para a resistência ao cisalhamento foi o TP de 2 s. Embora, para esta ferramenta, a resistência no TP de 4 s também tenha sido satisfatória, o aumento do TP não melhorou a resistência, uma vez que esta permaneceu estável. Estas observações sugerem que para a ferramenta cônica, a configuração de soldagem com TP de 2 s já se encontra próxima ao limite do aporte de energia para a produção da união. Esta observação está alinhada com as observações feitas no trabalho de AITA, 2017. Com relação à ferramenta hexagonal, esta resultou em soldas consideravelmente menos resistentes em comparação com a ferramenta cônica. Com a ferramenta hexagonal, na ausência de tempo de permanência (TP = 0) não há formação de união metalúrgica entre as chapas. Com TP de 2 s já se obtém união metalúrgica mas de baixa resistência. Somente com TP de 4 s a resistência melhora, mas apenas para um nível semelhante às soldas feitas com a ferramenta cônica e sem tempo de permanência. Ou seja, ficou evidente que, no caso da ferramenta hexagonal, é imprescindível o uso de TP para obter união metalúrgica. Também ficou notório que para esta ferramenta o aumento do TP melhora moderadamente a resistência ao cisalhamento das soldas.

Na comparação dos ensaios de cisalhamento entre as ferramentas fica claro que a ferramenta hexagonal proporcionou soldas de desempenho inferior à ferramenta convencional, o que está de acordo com os trabalhos feitos por Tuncel *et al*, 2017, e Bilici e Yukler, 2012.

Na tentativa de encontrar as razões para a discrepância no desempenho mecânico entre as duas ferramentas foi feita a tabulação das áreas soldadas medidas para todas as amostras (ver figura 32), cujos dados estão dispostos na tabela 6.

Tabela 6 - Área ZM e ensaio de cisalhamento

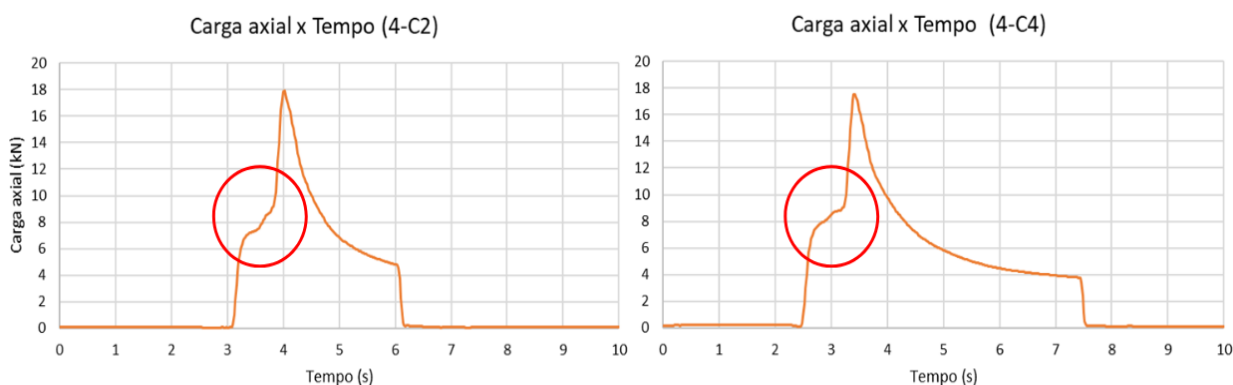
<b>Amostra</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Média do ensaio de cisalhamento (N)</b>
4-C4	30,46	2879,19
4-C2	28,65	2941,42
4-C0	21,24	1238,95
4-H4	28,09	1508,88
4-H2	26,51	1238,05

Fonte: o autor.

Os tamanhos das áreas da zona de mistura (ZM) não mostraram correlação direta com os ensaios de cisalhamento, como pode-se ver na tabela 6. Percebe-se que para cada ferramenta, a área soldada aumenta com o tempo de permanência. Contudo, esta correspondência não se manifesta na resistência ao cisalhamento nas soldas feitas com a ferramenta cônica nos tempos de permanência de 2 e 4 s. Possivelmente isso esteja ocorrendo por já se estar em uma condição otimizada em termos de aporte de energia, como será discutido mais a frente. Isto pode ser verificado por meio dos gráficos de carga axial x tempo que foram medidos durante as soldagens.

Na figura 34 observa-se no gráfico da amostra 4-C2, que na região destacada pelo círculo, a carga axial continua aumentando durante toda a etapa de penetração do pino, já no gráfico da amostra 4-C4, percebe-se de forma sutil, que a carga axial chega a um momento de constância ao final da penetração do pino. Isso demonstra que no TP de 4 s a ferramenta convencional. Já está no limite de aporte de energia possível para o processo, o que ocasiona a estabilização da resistência ao cisalhamento nessa ferramenta, mesmo que o TP aumente.

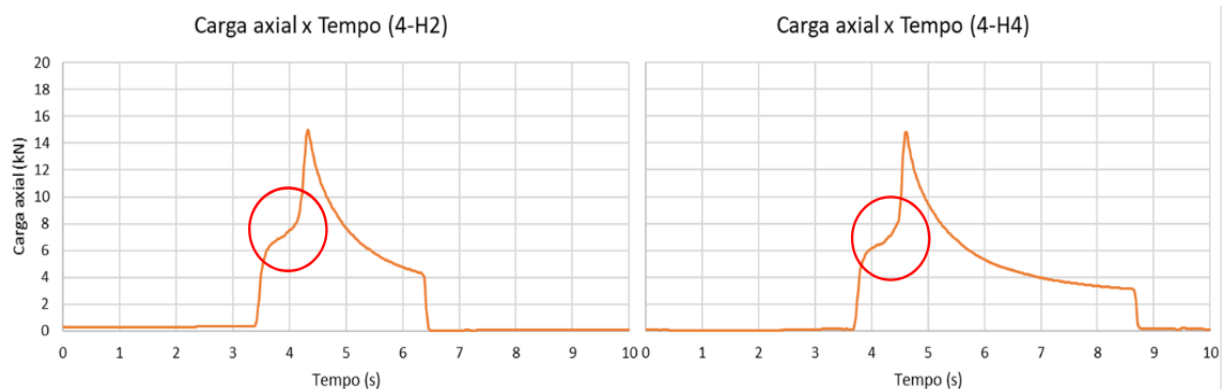
Figura 34 - Gráficos carga axial x tempo da ferramenta convencional.



Fonte: o autor.

Para a ferramenta hexagonal, na figura 35, percebe-se que a carga axial continua aumentando durante toda a etapa de penetração do pino, o que demonstra que o aporte de energia não chegou em sua máxima otimização do processo.

Figura 35 - Gráficos carga axial x tempo da ferramenta hexagonal.



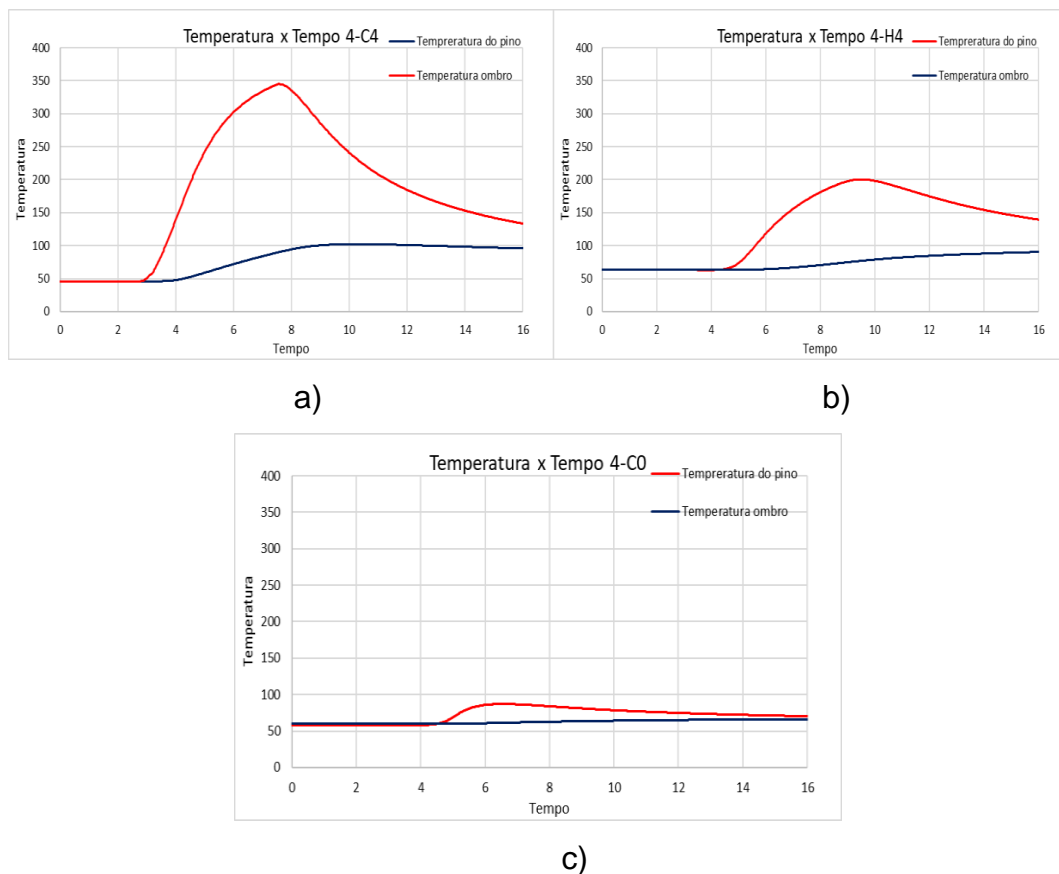
Fonte: o autor.

Ao comparar os dados das duas ferramentas entre si, percebe-se que a carga axial da ferramenta hexagonal tem um pico menor chegando a aproximadamente 14,59 kN nos três tempos de permanência. Já na ferramenta convencional a carga axial chega até 18,21 kN, o que pode ser uma explicação para a diferença de resistência ao cisalhamento entre ambas, uma vez que não se pode fazer correlação entre TP, ZM e a resistência das soldas. O estudo de Tier *et al*, 2017 demonstrou que a condição de adesão na interface entre as chapas superior e inferior exerce um papel importante na resistência final das juntas soldadas, não apenas o tamanho da ZM. Acredita-se que neste caso, as ferramentas cônica e hexagonal proporcionam adesão diferente na interface entre das chapas, de qualidade inferior para a

ferramenta hexagonal. Isso também pode explicar o fato destas soldas apresentarem resistência inferior àquelas feitas com a ferramenta cônica para o mesmo TP. No entanto, esta análise extrapola o proposto neste trabalho.

Em termos de microdureza observou-se que todas as amostras deram valores menores que o metal base, com exceção da amostra 4-C0. Isso pode ser explicado pelo processo de envelhecimento estudado por Dong *et al*, 2013, visto que esse fenômeno acontece após a soldagem, em virtude do amolecimento causado principalmente pelas altas temperaturas de pico e taxas de resfriamento. Ao observar os gráficos de Temperatura x Tempo de processo, na figura 36, pode-se notar que a ferramenta 4-C0 foi a que teve o menor valor de temperatura durante todas as etapas, assim tendo sua microdureza em valores que variam bastante, inclusive acima do valor de metal base. Já as outras amostras tiveram um perfil de microdureza mais plano sem variações distantes e gráficos parecidos.

Figura 36 - Gráficos de temperatura x tempo das amostras a) 4-C4; b) 4-H4; c) 4-C0;



Fonte: o autor.

Em todas as micrografias percebe-se claramente o refino da microestrutura dentro da zona de mistura, o que é esperado devido ao mecanismo de recristalização dinâmica que o material experimenta nessa região. Pode-se ver que nas soldas produzidas com tempo de permanência de 4 s a interface entre as chapas está imperceptível, o que evidencia um elevado fluxo entre o material das chapas nesta configuração de soldagem. Nas soldagens feitas com tempo de permanência de 2 s a interface está visível, mas distante do centro do botão de solda, estendendo-se para muito além da zona de mistura. Já na solda produzida sem tempo de permanência, somente na zona de mistura ocorreu união metalúrgica, o que está indicado pela interface que é bastante notória nestas soldas. Isso indica ausência de união metalúrgica já a partir da zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) próximo do centro da solda.

Por fim, analisando o monitoramento do processo é notável que o formato de ferramenta hexagonal não é a melhor opção para conseguir atingir os picos de temperatura e carga axial necessárias para se obter uma união metalúrgica de alta resistência ao cisalhamento.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral investigar o efeito da geometria do pino da ferramenta no processo de soldagem FSSW, em juntas sobrepostas de liga AA6060-T5. Para isso foram utilizadas duas ferramentas, uma com o pino em formato hexagonal e outra com formato convencional, empregando-se três tempos de permanência como parâmetro de estudo. As soldas foram submetidas a ensaio de cisalhamento, análise metalográfica e ensaio de microdureza para avaliar seu desempenho.

1. A geometria hexagonal da ferramenta demonstrou resistência ao cisalhamento menor, e também obteve carga axial de até 3,62 kN a menos durante o processo de soldagem, em comparação com a ferramenta cônica em todos os TP.

2. O tempo de permanência se demonstrou fundamental para haver união metalúrgica com o pino hexagonal. O aumento do TP com o pino hexagonal melhora moderadamente a resistência ao cisalhamento das soldas.

3. A geometria hexagonal da ferramenta teve resistência inferior ao produzido com a ferramenta C, cerca de 1703,37 N a menos no TP de 2 s e 1370,31 N a menos no TP de 4 s, sendo 57,90% e 47,59% menor, respectivamente.

4. O perfil de microdureza das amostras de ambas as ferramentas sofreu alterações com o aumento do TP. Conforme o TP aumentou, os valores de microdureza se tornaram mais planos.

5. Em termos de macroestrutura e microestrutura, as áreas das zonas de mistura aumentaram com o aumento do TP, em ambas as ferramentas. O que se demonstrou proporcional aos resultados de resistência ao cisalhamento, que também aumentaram com o aumento do TP, com exceção da ferramenta C nos TP de 2 e 4 s, possivelmente devido ao aporte de energia já estar otimizado em TP de 2 s para a ferramenta C.

## REFERÊNCIAS

AITA, Carlos. ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA (FSSW) DA LIGA AA6060-T5, 2017. Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa.

ALCAN, A. d. B. S. Manual de soldagem. ALCAN Alumínio do Brasil, 1993.

BABU, S *et al.*, Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy AA2014, 2012. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-012-0218-z>

BABU, S *et al.*, Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy AA2014, 2013. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-012-0218-z>

BADARINARAYAN, et al., *Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy*, 2009. Encontrado em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508001958>

BARBOSA, Carlos SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA A PONTO EM CHAPAS AUTOMOTIVAS DE AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO, 2021. Encontrado em: <http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/0000a7/0000a77e.pdf>

BILICI, M. K., YUKLER, A. I., Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets, 2012. *Materials & Design*: Volume 33, January 2012, Pages 145-152.

CAPELARI, T. V. Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA5052. Dissertação (Mestrado) —

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CERVEIRA, R. L. L. P. Caracterização experimental do comportamento mecânico sob solicitação multiaxial em junções de chapas AA2024-T3 soldadas por fricção-mistura ('FSW'). Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

DAVIS, J. R. ASM handbook. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International, 2009.

DONG, P.; SUN, D.; LI, H. Natural aging behaviour of friction stir welded 6005A-T5 aluminium alloy. Materials science and Engineering A, 2013. 29-35.

FEREIDUNI, E.; MOVAHEDI, M.; KOKABI, A. H. Aluminum/stell joints made by an alternative friction stir spot weldinf process. Journal of Materials Processing Technology, 224, 2015. 1-10

GULER, Hande *et al.*, Influence of the tool geometry and process parameters on the static strength and hardness of friction-stir spot-welded aluminium-alloy sheets, 2014. Encontrado em: [https://www.researchgate.net/profile/Hande\\_Gueler/publication/281731924\\_Influence\\_of\\_the\\_tool\\_geometry\\_and\\_process\\_parameters\\_on\\_the\\_static\\_strength\\_and\\_hardness\\_of\\_friction-stir\\_spot-welded\\_aluminium-alloy\\_sheets/links/59e8909e0f7e9bc89b5412e6/Influence-of-the-tool-geometry-and-process-parameters-on-the-static-strength-and-hardness-of-friction-stir-spot-welded-aluminium-alloy-sheets.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hande_Gueler/publication/281731924_Influence_of_the_tool_geometry_and_process_parameters_on_the_static_strength_and_hardness_of_friction-stir_spot-welded_aluminium-alloy_sheets/links/59e8909e0f7e9bc89b5412e6/Influence-of-the-tool-geometry-and-process-parameters-on-the-static-strength-and-hardness-of-friction-stir-spot-welded-aluminium-alloy-sheets.pdf)

HIRASAWAA, Shigeki *et al.*, Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method, 2010. Encontrado em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610001135>

JAMBHALE, Sachin *et al.*, Effect of Process Parameters & Tool Geometries on Properties of Friction Stir Spot Welds: A Review 2015. Encontrado em:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.838.3664&rep=rep1&type=pdf>

KIM, Ju-Ri *et al.*, Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys, 2017. Encontrado em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12541-017-0053-0.pdf>

KIM, Ju-Ri *et al.*, Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys, 2016. Encontrado em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12541-017-0053-0.pdf>

PAIDAR, Moslem *et al.*, Effect of welding parameters (plunge depths of shoulder, pin geometry, and tool rotational speed) on the failure mode and stir zone characteristics of friction stir spot welded aluminum 2024-T3 sheets, 2015. Encontrado em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12206-015-1009-x.pdf>

PAIDAR, Moslem *et al.*, Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets, 2014. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-014-1108-0>

PAN, Tsung-Yu *et al.*, Friction Stir Spot Welding (FSSW) – A Literature Review, 2007. Encontrado em: [https://www.researchgate.net/publication/289880699\\_Friction\\_Stir\\_Spot\\_Welding\\_FS\\_SW\\_-\\_A\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/289880699_Friction_Stir_Spot_Welding_FS_SW_-_A_Literature_Review)

PATEL, Vivek V. *et al.*, Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys, 2016. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13632-016-0264-2>

ŞAŞMAZ, Melike *et al.*, Friction Stir Spot Welding for Different Metals: A Review, 2017. Encontrado em: [http://indexive.com/uploads/papers/pap\\_indexive15951726092147483647.pdf](http://indexive.com/uploads/papers/pap_indexive15951726092147483647.pdf)

SHARMA, Chaitanya *et al.*, Friction Stir Spot Welding-Process and Weld Properties: A Review, 2021. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40033-021-00276-z>

SHIRALY *et al.*, Effect of Tool Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Behavior of Friction Stir Spot-Welded Al/Cu Composite, 2014. Encontrado em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-013-0768-8>

SURYANARAYANAN, R. *et al.*, Studies on the influence of process parameters in friction stir spot welded joints – A review, 2021. Encontrado em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320364142?casa\\_token=7olkKjtoZ\\_EAAAAA:am\\_pXhirkXCf7F0zGs18a7I1V83Jp8YWDKQw2mxskqdq8ZZfTo\\_sNCzwslrzelF5U9S4q3KB2FdcDIw](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320364142?casa_token=7olkKjtoZ_EAAAAA:am_pXhirkXCf7F0zGs18a7I1V83Jp8YWDKQw2mxskqdq8ZZfTo_sNCzwslrzelF5U9S4q3KB2FdcDIw)

TIER, M. D. *et al.*, The weld interface for friction spot welded 5052 aluminium alloy, 2017. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 90 Combined 1-4.

TOZAKIA, Yasunari *et al.*, Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys, 2007. Encontrado em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695507001204>

TUNCEL, O. *et al.*, Tool Pin Geometry Effect on Fracture Characteristics of 6082-T6 Friction Stir Spot Welds in Lap Shear Test, 2017. ICADET – International Conference on Advanced Engeneering Technologies. Encontrado em: <https://www.researchgate.net/publication/320024232>

YANG, X. W. *et al.*, Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling, 2014. Encontrado em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/697170/>

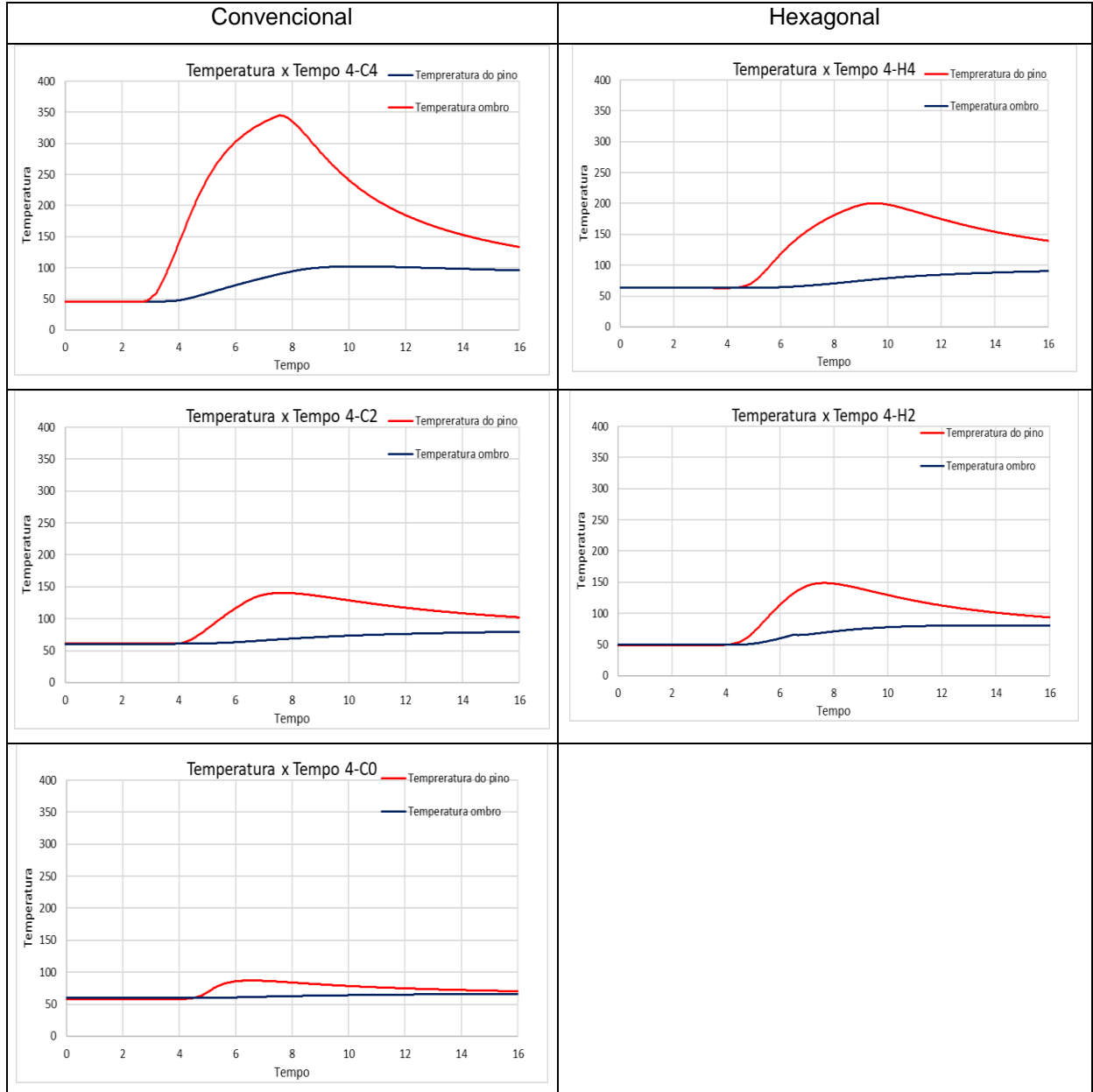
ZHANG, Zhaohua *et al.*, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, 2011. Encontrado em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911002330?casa\\_token=r](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911002330?casa_token=r)

svMSQs6s2oAAAAA:Y9fKRnNujVEUaqIhzJCpaL51zayYwYjijxAfXYE1kdtX5shIKzK5j  
JYKNDO3ER4ieLP5QGid68s\_Mq

ZLATANOVIC, Danka Labus *et al.*, Influence of Tool Geometry and Process Parameters on the Properties of Friction Stir Spot Welded Multiple (AA 5754 H111) Aluminium Sheets, 2021. Encontrado em:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7957550/>

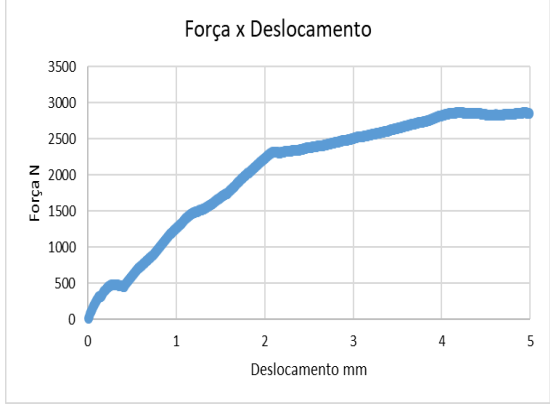
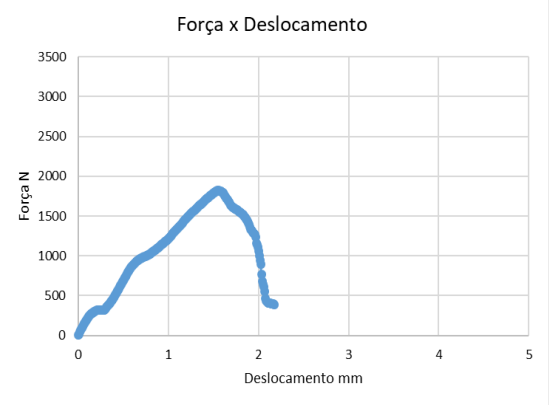
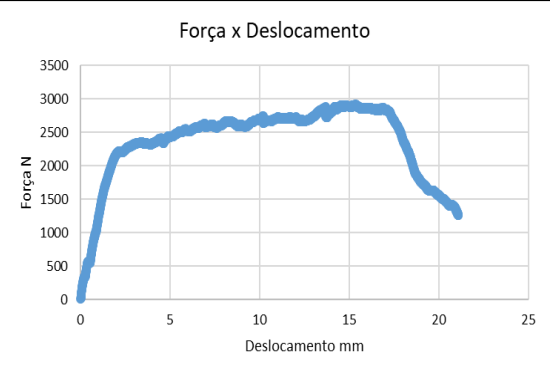
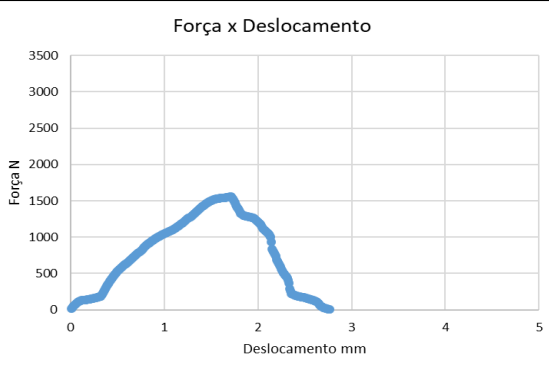
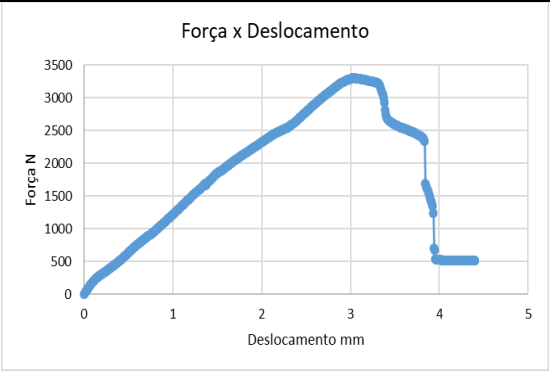
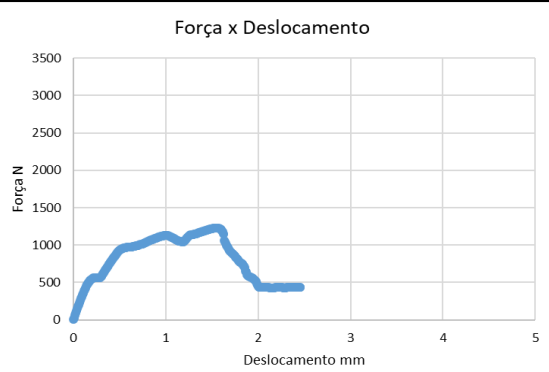
## APÊNDICE I

Gráficos de Temperatura x Tempo das amostras 4-C4, 4-C2, 4-C0, 4-H4 e 4-H2.

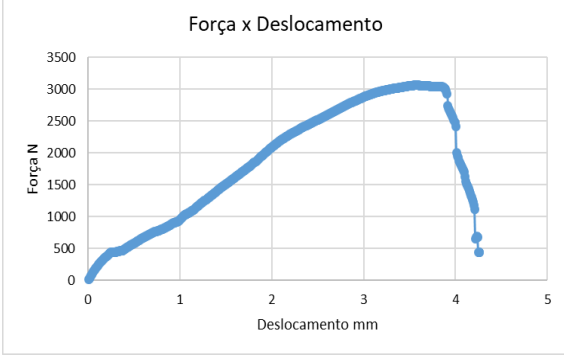
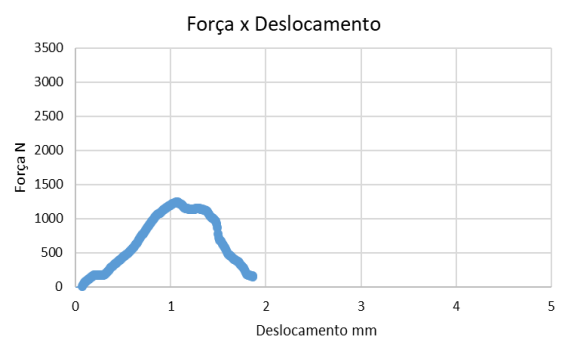
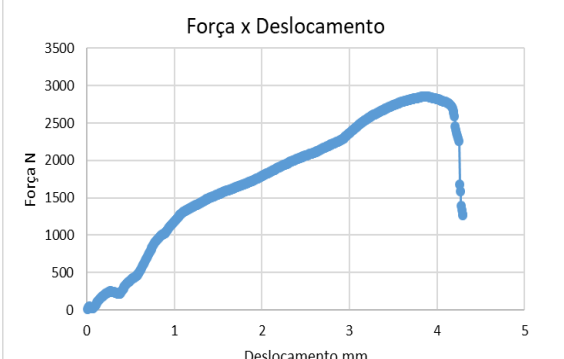
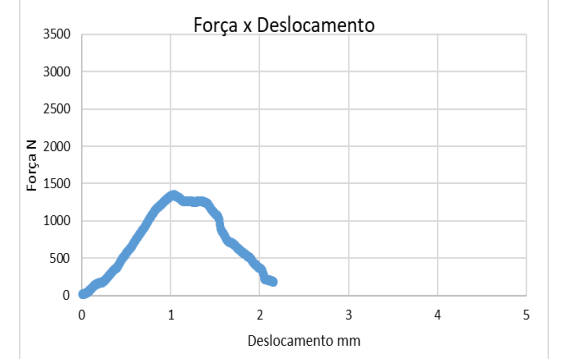
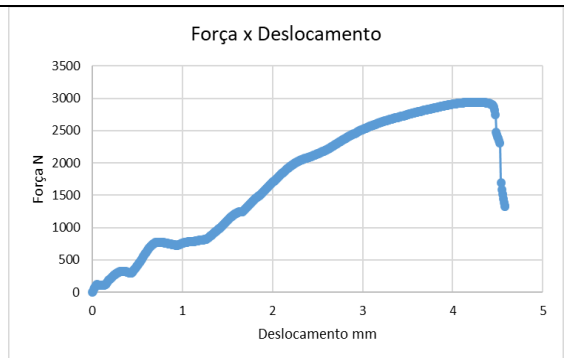
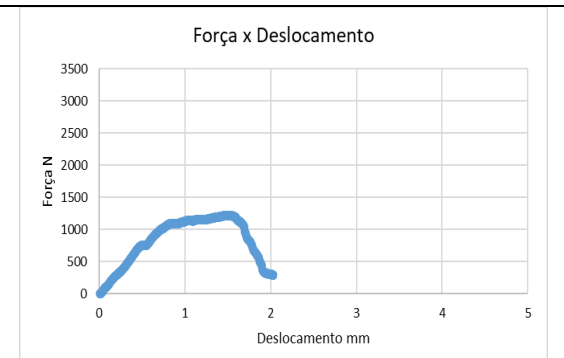
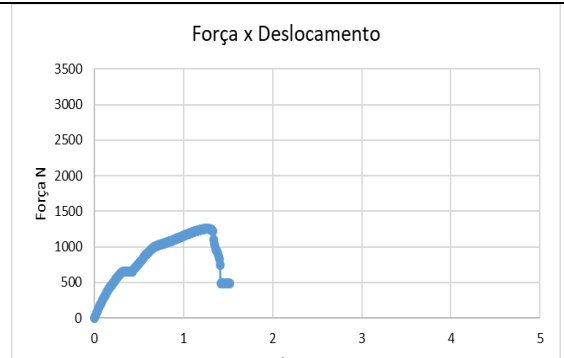


## APÊNDICE II

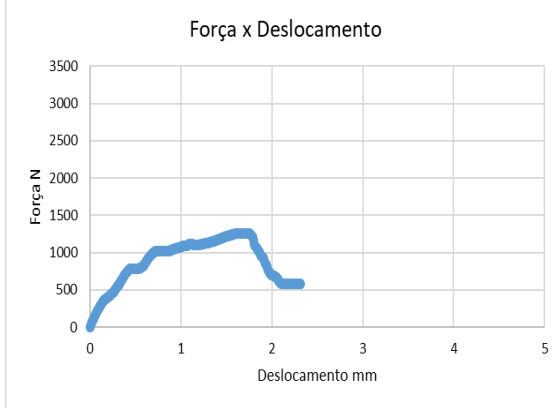
Gráficos da Força x Deslocamento de todas as amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento.

Ferramenta Convencional	Ferramenta Hexagonal
<p style="text-align: center;">1-C4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>	<p style="text-align: center;">1-H4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>
<p style="text-align: center;">2-C4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>	<p style="text-align: center;">2-H4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>
<p style="text-align: center;">3-C4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>	<p style="text-align: center;">3-H4</p>  <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p>



<p style="text-align: center;"><b>1-C2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 	<p style="text-align: center;"><b>1-H2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 
<p style="text-align: center;"><b>2-C2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 	<p style="text-align: center;"><b>2-H2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 
<p style="text-align: center;"><b>3-C2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 	<p style="text-align: center;"><b>3-H2</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 
<p style="text-align: center;"><b>1-C0</b></p> <p style="text-align: center;">Força x Deslocamento</p> 	Empty graph area
Empty graph area	Empty graph area

2-C0



3-C0

