



Universidade Federal do Pampa

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS ALEGRETE**

**ALEXANDRE VASCONCELLOS DOS REIS**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE SOLDA  
POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE (C110)**

**Alegrete-RS 2019**

**ALEXANDRE VASCONCELLOS DOS REIS**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE SOLDA  
POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE (C110)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica na Universidade  
Federal do Pampa.

Orientador: Aldoni Gabriel Wiedenhof

**Alegrete 2019**

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) .

R331i Reis, Alexandre Vasconcellos  
Influência da geometria da ferramenta no processo de solda por fricção (FSW) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110) / Alexandre Vasconcellos Reis.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.

"Orientação: Aldoni Gabriel Wiedenhöft".

1. Influência da geometria da ferramenta. 2. solda por fricção. 3. parâmetros de soldagem. I. Título.

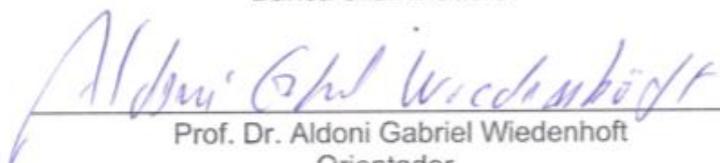
ALEXANDRE VASCONCELLOS DOS REIS

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE  
SOLDA POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE  
(C110).

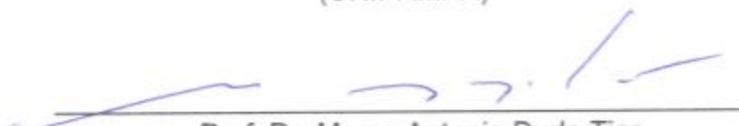
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Mecânica da  
universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial à obtenção  
do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28/11/2019.

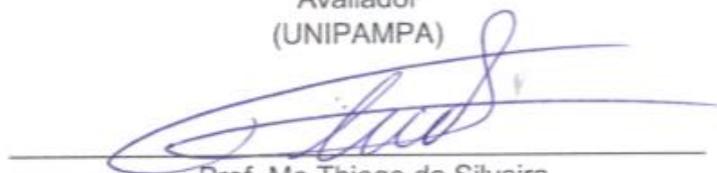
Banca examinadora:



Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhoft  
Orientador  
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier  
Avaliador  
(UNIPAMPA)



Prof. Me Thiago da Silveira  
Avaliador  
(UNIPAMPA)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças de ter chegado até aqui apesar de todos acontecidos, à minha mãe Maria Cirlei Ulharuso de Vasconcellos que em todos momentos sempre me apoiou e incentivou, aos meus irmãos Cristiano e Carlos Eduardo Vasconcellos dos Reis que não mediram esforços para que meu sonho se tornasse realidade e acreditaram em meu potencial.

Aos meus tios Nadya Candal de Vasconcellos e Verlaine Ulharuso de Vasconcellos por apesar de longe sempre manterem o apoio e confiarem em minha capacidade.

Ao Professor Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhof, por ter se disponibilizado e se feito presente desde de o início do projeto de pesquisa, sempre incentivando e apontando os pontos em destaque e a direção a ser seguida, ao Professor Dr. Marco Antônio Durlo Tier por ter contribuído e utilizado de seus contatos para complementar o tema do trabalho, aos técnicos Ivan Mangini Lopes Júnior e Dieison Gabbi Fantineli por não medirem esforços no auxílio dos experimentos e ensaios e sempre se mostrarem disponíveis para contribuir.

Aos meus amigos e companheiros de estudos, Frederico Temp, Fernando Hendges, Lucas Dias, João Dorneles, entre outros, que em geral de alguma forma contribuíram para que este momento se tornasse possível.

## RESUMO

A técnica de soldagem por fricção *Friction Stir Welding* (FSW) é relativamente nova quando comparada a outros processos utilizados em larga escala pelas indústrias, onde foi desenvolvida e patenteada no *The Welding Institute* (TWI) no Reino Unido em 1991, essa técnica consiste na união de um ou mais materiais no estado sólido e sem fusão dos mesmos. A obtenção de soldas de qualidade possui diversas variáveis, em especial da geometria de ferramenta e dos parâmetros de soldagem envolvidos, dentre eles, velocidade de soldagem e de rotação. Definidas corretamente as combinações de ferramenta, material a unir e parâmetros, as propriedades mecânicas obtidas nas soldas são similares a do material no estado inicial. O presente estudo tem como objetivo geral analisar a relação entre a variável ferramenta, alternando a geometria da mesma, quando submetida a um conjunto de parâmetros de processo com objetivo de obter soldas com menor nível de descontinuidades nas ligas de alumínio (6060 T5) e o cobre (C110), mantendo uma velocidade de rotação e velocidade de avanço constante para todas as amostras. Decompondo em objetivos específicos para determinar os parâmetros adequados ao processo, desde a confecção, têmpera e revenimento das ferramentas em aço SAE H13 até os ensaios de microdureza e tração, realizados para análise das propriedades mecânicas resultantes das soldas e comparando as mesmas em função da variação da geometria. Considerando as etapas gerais do processo, de acordo com a bibliografia auxiliar, e os procedimentos a serem executados nos ensaios e experimentos, pode-se concluir que estudo e a metodologia utilizada para avaliar os resultados possibilitaram a verificação da influência da alteração do perfil da ferramenta, onde a ferramenta de geometria hexagonal apresentou os melhores resultados, sendo esses valores considerados satisfatórios, quando comparados a estudos e trabalhos anteriores do tema, espera-se que o trabalho contribua para o conhecimento da área de soldagem por fricção entre dois materiais distintos.

**Palavras-chave:** Friction Sitr Welding; Ferramenta; Alumínio; Cobre; Parâmetros.

## ABSTRACT

The Friction Stir Welding (FSW) Friction Welding Technique is relatively new compared to other large-scale processes used by industries where it was developed and patented at The Welding Institute (TWI) in the UK in 1991, this technique consists of joining of one or more solid-state and non-fused materials thereof. Obtaining quality welds has several variables, especially the tool geometry and welding parameters involved, including welding speed and rotation. Correctly defined tool combinations, joining material and parameters, the mechanical properties obtained in welds are similar to that of the material in the initial state. The present study aims to analyze the relationship between the tool variable, alternating its geometry, when subjected to a set of process parameters aiming to obtain welds with lower level of discontinuities in aluminum alloys (6060 T5) and the copper (C110), maintaining a constant rotation speed and feedrate for all samples. Decomposing into specific objectives to determine the appropriate process parameters, from the fabrication, quenching and tempering of SAE H13 steel tools to the microhardness and tensile tests, performed to analyze the mechanical properties resulting from the welds and comparing them as a function of variation. of geometry. Considering the general steps of the process, according to the auxiliary biography, and the procedures to be performed in the tests and experiments, it can be concluded that the study and the methodology used to evaluate the results made it possible to verify the influence of the tool profile change. , where the hexagonal geometry tool presented the best results, and these values are considered satisfactory, when compared to previous studies and works on the subject, it is expected that the work contributes to the knowledge of the friction welding area between two different materials.

**Keywords:** Friction Stir Welding; Tool; Aluminum; Copper; Parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquematização do processo de Soldagem por FSW. ....	14
Figura 2– Regiões da solda. ....	15
Figura 3– Ferramenta FSW. ....	17
Figura 4– Tipos de perfis do suporte.Fonte: Adaptado de MISHRA et al., 2005. ....	19
Figura 5– Perfil côncavo e plano. ....	20
Figura 6– Geometria de pinos mais utilizados. ....	20
Figura 7– Fresadora CNC ROMI D800. ....	25
Figura 8– Dispositivo de fixação. ....	25
Figura 9– Material base da solda. ....	26
Figura 10– Ferramenta de solda. ....	27
Figura 11– Dimensões da ferramenta. ....	27
Figura 12– Cordão selecionado x descartado. ....	29
Figura 13– Corpo de prova para ensaio de tração. ....	30
Figura 14– Dispositivo SHIMADZU. ....	30
Figura 15– Dispositivo BUEHLER micromet 6010. ....	31
Figura 16– Confecção das ferramentas. ....	32
Figura 17– Geometria das ferramentas. ....	32
Figura 18– Catálogo Aços Ferramentas Favorit. ....	33
Figura 19–Resultado cordão obtido com a ferramenta 1. ....	34
Figura 20–Resultado cordão obtido com a ferramenta 2. ....	34
Figura 21–Resultado cordão obtido com a ferramenta 3. ....	35
Figura 22–Resultado cordão obtido com a ferramenta 4. ....	35
Figura 23–Resultado cordão obtido com a ferramenta 5. ....	36
Figura 24– Corpos de prova do ensaio de tração da placa A. ....	37
Figura 25– Corpos de prova do ensaio de tração da placa A. ....	38
Figura 26– Corpos de prova do ensaio de tração da placa B. ....	39
Figura 27– Corpos de prova do ensaio de tração da placa B. ....	40
Figura 28– Corpos de prova do ensaio de tração da placa C. ....	40
Figura 29– Corpos de prova do ensaio de tração da placa C. ....	41
Figura 30– Corpos de prova do ensaio de tração da placa D. ....	42
Figura 31– Corpos de prova do ensaio de tração da placa D. ....	43

Figura 32–	Corpos de prova do ensaio de tração da placa E. ....	44
Figura 33–	Corpos de prova do ensaio de tração da placa E. ....	45
Figura 34–	Macrografia para a placa A. ....	47
Figura 35–	Macrografia com filtro para a placa A. ....	48
Figura 36–	Macrografia para a placa B. ....	48
Figura 37–	Macrografia com filtro para a placa B. ....	49
Figura 38–	Macrografia para a placa C. ....	49
Figura 39–	Macrografia com filtro para a placa C. ....	50
Figura 40–	Macrografia para a placa D. ....	50
Figura 41–	Macrografia com filtro para a placa D. ....	51
Figura 42–	Macrografia para a placa E. ....	51
Figura 43–	Macrografia com filtro para a placa E. ....	52
Figura 44–	Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa A. ....	53
Figura 45–	Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa B. ....	53
Figura 46–	Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa C. ....	54
Figura 47–	Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa D. ....	54
Figura 48–	Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa E. ....	55

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Propriedades do Aço ABNT H13. ....	21
Tabela 2– Ligas de alumínio e seus elementos. ....	22
Tabela 3– Propriedades do alumínio 6060 T5. ....	22
Tabela 4– Classificação das ligas de cobre. ....	23
Tabela 5– Características do cobre eletrolítico C110. ....	24
Tabela 6– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	37
Tabela 7– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	38
Tabela 8– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	39
Tabela 9– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	41
Tabela 10– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	42
Tabela 11– Relação nomenclatura adotada x ferramentas. ....	44
Tabela 12– Relação desvio padrão x tensão média. ....	45
Tabela 13– Propriedades mecânicas das ligas. ....	45
Tabela 14– Eficiência das propriedades mecânicas obtidas.....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

Al – Alumínio

ASTM - American Society for Testing Materials

Cu – Cobre

FSW – Friction Stir Welding

SSW - Solid State Welding

ZM – Zona de mistura

TWI – The Welding Institute

ZAT – Zona afetada termicamente

ZATM – Zona afetada termo-mecanicamente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos .....	14
1.2	Objetivos específicos.....	15
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1	Soldagem por atrito.....	15
2.2	Solda por fricção FSW .....	16
2.2.1	Variáveis do processo .....	17
2.2.2	Região de solda .....	18
2.3	Ferramenta FSW .....	19
2.3.1	Variação de geometria da ferramenta.....	21
2.3.2	Perfil do ombro .....	21
2.3.3	Perfil do pino.....	23
2.3.4	Materiais utilizados para ferramenta FSW .....	24
2.4	Liga de alumínio 6060 T5 .....	24
2.5	Cobre eletrolítico C110 .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
3.1	Materiais e equipamentos.....	27
3.1.1	Equipamento.....	27
3.1.2	Dispositivo de fixação.....	28
3.1.3	Metal de base .....	28
3.1.4	Ferramenta .....	29
3.2	Sistema de organização das amostras.....	30
3.3	Procedimentos experimentais.....	31
3.3.1	Parâmetros de soldagem.....	31
3.3.2	Ensaios.....	31
3.3.2.1	Acabamento superficial.....	32
3.3.2.2	Ensaio de tração.....	32
3.3.2.3	Macrografia.....	33
3.3.2.4	Microdureza .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
4.1	Confecção da ferramenta .....	34

4.2	Análise Visual .....	36
4.3	Ensaio de tração.....	38
4.4	Macrografia .....	48
4.5	Microdureza .....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
5.1	Sugestões para estudos futuros.....	58
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	59

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, a demanda exige cada vez mais o surgimento de novos materiais, com alta resistência mecânica e baixo peso, isso tem resultado no surgimento e desenvolvimento de novos métodos de união, colocando a soldagem por atrito de forma mais intensa no mercado, ainda mais quando o objetivo é buscar alto desempenho levando em consideração as limitações dos materiais, assim a utilização de ligas de alumínio (Al) e cobre (Cu) nas indústrias foi fundamental.

Por serem matérias que possuem grande escala de aplicação nas indústrias, sejam mecânicas, elétricas, entre outras, a união entre o cobre e alumínio está recebendo cada vez mais significância e atenção por meio de estudos e experimentos, buscando componentes que atendam exigências e tragam benefícios significativos, sendo eles técnicos e econômicos.

O processo *Friction Stir Welding* (FSW) surgiu em 1991 no Reino Unido, foi desenvolvido no *The Welding Institute* (TWI), o qual mantém sua patente (THOMAS et al., 1991). O surgimento do processo possibilitou a união de diferentes materiais, como alumínio e cobre, a deformação plástica causada por uma ferramenta dita não consumível, onde a mesma é formada por um pino de penetração e um ombro. No processo FSW, não ocorre a fusão e sim a união no estado sólido dos materiais, por esta razão, evitam-se os problemas que ocorrem na mudança de fase e possibilita obter uma junta de qualidade.

Justifica-se este trabalho à verificação da influência da alteração do perfil da ferramenta, devido que dos estudos já realizados sobre FSW, são poucos os que estudaram o efeito da geometria da ferramenta como variável no processo. Para o aperfeiçoamento deste processo, o estudo busca analisar e verificar a combinação de diversos parâmetros de soldagem com a utilização de uma ferramenta confeccionada, com auxílio de um centro de usinagem.

### 1.1 Objetivos

O trabalho realizado tem como principal objetivo verificar e analisar a relação entre as variáveis do processo de Friction Stir Welding (FSW) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110) e a geometria da ferramenta utilizada, alternando a geometria da

mesma, combinando com alguns parâmetros, como velocidade de rotação, velocidade de soldagem e inclinação da ferramenta.

## 1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos buscou-se analisar e interpretar os resultados, através da análise superficial, ensaio de tração, macrografia da região de solda e microdureza na seção transversal da solda. Onde o estudo visa obter e avaliar os valores obtidos, de maneira que permitam a identificação dos efeitos da variação, ao se alternar a geometria da ferramenta utilizada no processo, apresentando juntas satisfatórias, ou seja, que apresentem o menor nível de descontinuidade possível.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Soldagem por atrito

A forma de unir um material depende diretamente de sua aplicação, como no caso das ligas de alumínio onde tem ampla utilização na área automobilística e na indústria aeronáutica. Por isso o processo de soldagem e a união dos materiais são essenciais ao desenvolvimento dos produtos, estando ligados diretamente a uma parcela do custo do mesmo. Portanto, a utilização do processo em larga escala estará vinculada aos custos resultantes (ASMA,1990).

A diversidade de processos de soldagem desenvolvidos atualmente demonstra a grandeza dessa área de fabricação, pois enquanto a indústria desenvolve novos materiais é necessário aprimorar seus métodos de união, sendo exigida cada vez mais a qualidade na resistência mecânica da união e no processo.

A soldagem no estado sólido (SSW), onde se encontra a soldagem por *Friction Stir Welding (FSW)*, processo cujo o qual é de interesse neste estudo, foi desenvolvida decorrente da soldagem por atrito convencional, onde aplica-se de forma mais intensa em peças com geometria de sólidos de revolução.

A termo-mecânica está diretamente ligada ao processo de união por atrito, sendo a mesma usada como base para eficiência do processo. Foram identificadas

algumas aplicações do processo de soldagem por atrito desde a década de 1950, onde era utilizada para gerar calor, conformar e por fim realizar a soldagem.

O fator mais considerado no processo de soldagem por atrito, é a capacidade de obter uma união de materiais no estado sólido, descartando a utilização de fusão e respeitando as limitações de materiais que possuem soldabilidade limitada devido à fusão e solidificação (NICHOLAS, 2003).

No processo de soldagem por atrito, a variável que facilita o processo de deformação é o calor, sendo obtido na conversão de energia mecânica para energia térmica nos materiais. No processo convencional, o atrito entre uma peça parada e uma em movimento de rotação, sofrendo pressão de contato, causando elevação na temperatura e facilitando a deformação na área de interação. Então o processo de soldagem por atrito gera calor por atrito, dissipa calor, deforma plasticamente o material (ASM, 1990).

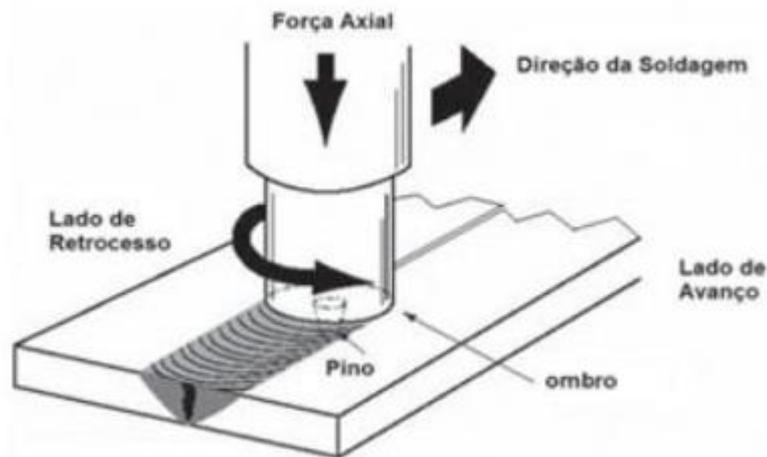
## **2.2 Solda por fricção FSW**

A solda por fricção Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem que ocorre no estado sólido do material, onde o metal não é fundido, usando como terceiro uma ferramenta para unir as duas superfícies em contato. O calor que é gerado entre a ferramenta e os materiais a serem unidos, provoca o amolecimento da região próxima da ferramenta de FSW, que mistura mecanicamente os materiais devido à alta temperatura e pressão mecânica.

O processo foi desenvolvido e patenteado no The Welding Institute (TWI) no Reino Unido em dezembro de 1991, sendo a primeira patente a que melhor detalha o procedimento de soldagem (THOMAS et al., 1991). Atualmente, esse processo é bastante utilizado na união de materiais por possuir grande capacidade para a solda de materiais diferentes, como alumínio, cobre, aço, entre outros.

No processo FSW, uma ferramenta cilíndrica e não consumível, composta de ombro e pino perfilado, roda com determinada velocidade, avançando transversalmente com velocidade constante em uma junta de topo entre duas peças rigidamente fixadas, como é mostrada na Figura 1.

Figura 1- Esquemática do processo de Soldagem por FSW.



Fonte: Adaptado de FIORAVANTI, 2009.

O calor reduz a resistência mecânica do material, reduzindo a tensão de escoamento, facilitando o escoamento, também chamado de fluxo plástico do material, onde o movimento do pino da ferramenta conduza o material numa combinação de extrusão e forjamento gerado pelo suporte ao longo da junta, resultando na solda (ERICSSON e SANDSTROM, 2003).

### 2.2.1 Variáveis do processo

São diversas as variáveis envolvidas no processo de soldagem por FSW, os fatores com maior importância, que antecedem a realização deste processo, são: o tipo junta desejada, a propriedade do material a ser unido, máquina-ferramenta, ferramenta de soldagem e os parâmetros de soldagem.

Os parâmetros mais importantes na soldagem podem ser identificados como: Velocidade de rotação da ferramenta (rpm), a velocidade de avanço (mm/min), ângulo de inclinação e a penetração da ferramenta (MISHRA et al., 2005).

Segundo ERICSSON e SANDSTROM (2003), a velocidade de rotação e de avanço, possuem destaque dentre os principais fatores, pois a rotação ocasiona o agito e a mistura dos materiais através do pino e o avanço move o material agitado.

Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a geração de calor, pois estão diretamente interligadas, com o aumento do aquecimento respectivamente obtém-se a maior movimentação do material no estado plástico. O aquecimento influencia e contribui na mistura do cordão de solda. (MISHRA et al., 2005).

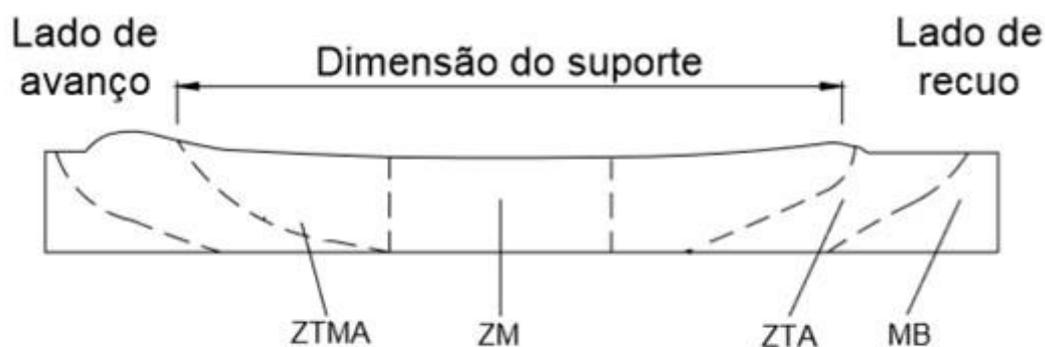
Segundo TAN (2013), pequenas trincas, vazios e cavidades estão propícias a ocorrer devido a velocidade de avanço muito baixa ou muito alta. Então, a velocidade de avanço está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas, a microestrutura e o tamanho do Nugget resultante do processo. A geração de calor é proporcional a velocidade de rotação, pois quanto maior o avanço, menor será o aquecimento, portanto, quanto menor a velocidade avanço, maior será a geração de calor.

Diversos estudos foram realizados com a ferramenta inclinada, variando o valor do ângulo entre 1,5 e 4,5°. A inclinação da ferramenta, segundo ZHAO et al. (2005), possibilita um melhor deslocamento do material da frente para trás do pino e provoca uma compressão maior na parte de trás, assim, evitando possíveis vazios ou cavidades e contribuindo para uma melhor união dos materiais.

### 2.2.2 Região de solda

A macroestrutura resultante formada pela união por FSW possui diferenças em relação às obtidas por processos de soldas por fusão. Ela pode ser dividida em diversas regiões, como mostrado e identificado na Figura 2.

Figura 2– Regiões da solda



Fonte: Adaptado de ATTALLAH e SALEM (2005).

Conforme a Figura 2, segundo ATTALLAH e SALEM (2005), são descritos os seguintes padrões para cada região de soldagem como:

- Metal base (MB): região não afetada pelo calor e deformação induzida pela ferramenta utilizada na soldagem.
- Zona afetada termicamente (ZAT): região afetada somente pelo ciclo térmico durante a soldagem. O calor provoca uma modificação na microestrutura e nas propriedades mecânicas da peça, porém sem deformação plástica localizada na microestrutura.
- Zona afetada Termo-mecanicamente (ZATM): nesta região, o material é afetado por uma deformação plástica ocasionada pela ferramenta de soldagem e também pelo fluxo de calor resultante, exercendo algum tipo de influência na modificação na microestrutura. Com o aquecimento, poderá ocorrer o aumento da dureza das peças.
- Zona de mistura (ZM): é a região central da solda, também chamada de nugget para ligas de alumínio, esta região é onde ocorre a recristalização dos grãos, no qual possui grãos equiaxiais e finos. A ferramenta utilizada está ligada diretamente com o tamanho desta região, onde a largura será relativamente um pouco maior que o diâmetro do pino e pouco menor que o do ombro.

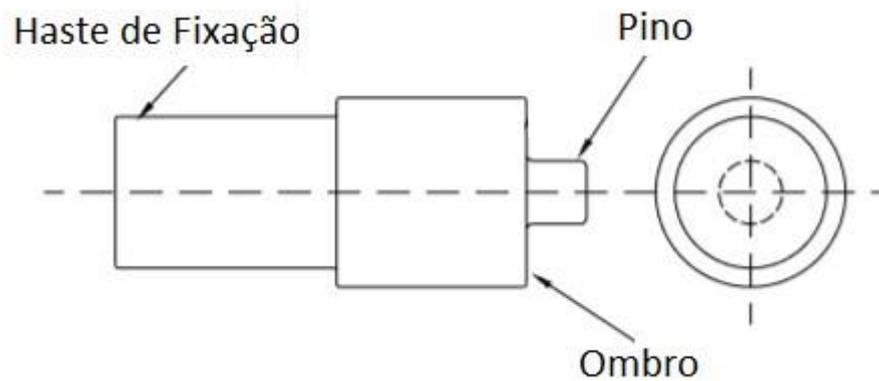
### **2.3 Ferramenta FSW**

A ferramenta utilizada na soldagem é de grande influência e importância no resultado final obtido no processo, com isso é importante a definição da geometria adotada da mesma, possui interferência direta na geração de calor e no fluxo plástico do material, fatores os quais influenciam respectivamente as propriedades mecânicas da junta (ZHAO, 2005).

A ferramenta utilizada é propriamente dita não-consumível, apesar de apresentar desgaste por conta do atrito entre as peças, onde a mesma é composta geometricamente por uma haste onde é realizada a fixação na máquina-ferramenta,

uma região correspondente a um suporte conhecida por *shoulder*, ou ombro na tradução, e por fim uma terceira parte denominada pino, ou *pin*. A divisão geométrica citada pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Ferramenta FSW.



Fonte: Adaptado de ATTALLAH e SALEM (2005).

Cada seção que forma a ferramenta utilizada no processo possui uma ou mais funções específicas atuantes na consolidação da união da junta. A face da ferramenta, também chamada de suporte e o pino da ferramenta são as duas partes fundamentais a serem consideradas. O suporte, quando submetido a compressão sobre a superfície das chapas e também sob a rotação imposta, torna-se o principal responsável pela geração de calor no processo de atrito estabelecido THOMAS e DOLBY (2002).

A redução do limite de escoamento, o qual facilita o processo de escoamento plástico do material e, por consequência, a soldagem, ocorre por conta do calor gerado resultado do atrito entre a superfície do suporte e as chapas. Outra função do suporte, seria a de contenção da saída de material que é causada pelas forças reativas do material em torno do pino da ferramenta durante o escoamento (BUFFA et al., 2006). A função do pino, não menos importante, segundo THOMAS e DOLBY (2002), seria gerar o trabalho mecânico da deformação do material, controlando por assim o escoamento em torno de si próprio e na parte inferior do suporte da ferramenta, este processo é considerado de conformação por extrusão de material, onde o material tem tendência de se posicionar na frente do pino devido as reações das forças.

A deformação de material, considerada por BUFFA et al. (2006), onde ele classificou o pino como a fonte primária responsável por deformação e como fonte

secundária de geração de calor, enquanto o suporte da ferramenta seria a fonte secundária de deformação e a primária na geração de calor. Portanto, o pino e suporte da ferramenta são elementos responsáveis diretamente pela deformação mecânica e pela geração de calor, que facilitam por assim a deformação e a união as chapas.

### **2.3.1 Variação de geometria da ferramenta**

A chave principal para se obter sucesso no processo de solda por FSW é a geometria da ferramenta adotada, onde as características principais que são levadas em consideração são o tamanho do ombro do suporte e o formato do pino de penetração. Segundo BUFFA et al. (2006), dos estudos realizados até atualmente, são poucos os que abordam o efeito da geometria da ferramenta como variável do processo de solda por fricção, pela complexibilidade do tema.

A influência da mudança de perfil do pino, podendo ser de perfil cilíndrico ou apresentar determinado ângulo, até mesmo com presença de rosca, além das variações de altura e comprimento do mesmo, são fatores a serem estudados e que estão diretamente interligados a qualidade da solda.

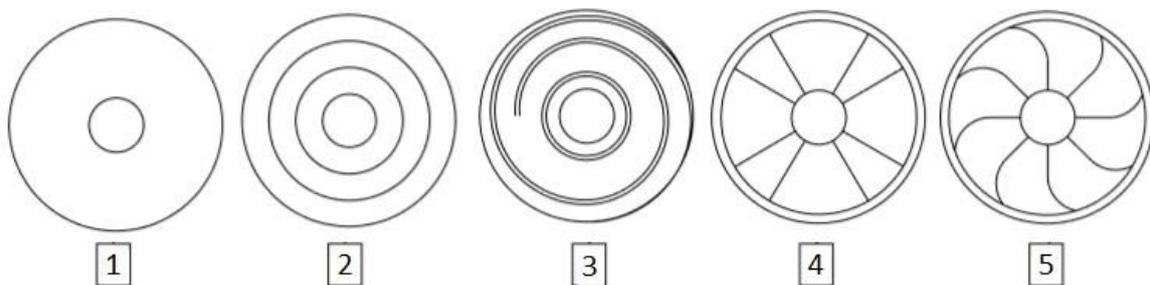
O suporte pode receber alterações como a presença de reentrâncias negativas, perfis salientes ou planos, ranhuras ao eixo de simetria da ferramenta, o próprio diâmetro do suporte é considerado uma variável, pois ele é responsável pela maior parte do calor gerado no processo, sendo esse calor necessário para a consolidação da solda (BUFFA et al., 2006).

### **2.3.2 Perfil do ombro**

São vários os perfis de suportes que podem ser utilizados, aonde seu objetivo de projeto é atender a união de diversos e diferentes materiais, o suporte da ferramenta, também chamado de ombro, tem a função de manter o material para que não ocorra a expulsão, favorecendo o escoamento do material ao redor do pino de penetração, o perfil do suporte adotado é o encarregado mecanicamente de forjar a junta dos materiais, desenvolvendo rebarbas durante o processo.

O volume negativo do suporte, nas ferramentas com reentrâncias, é preenchido pelo material no estado de escoamento plástico, onde o objetivo é fazer com que menos material seja expulso para fora da região em contato, resultando em um melhor forjamento de cordão de solda e diminuição da formação de rebarbas (DAWES e THOMAS, 1999). A Figura 4 ilustra os diferentes tipos de perfis, com rebaixos e planos.

Figura 4 – Tipos de perfis do suporte.

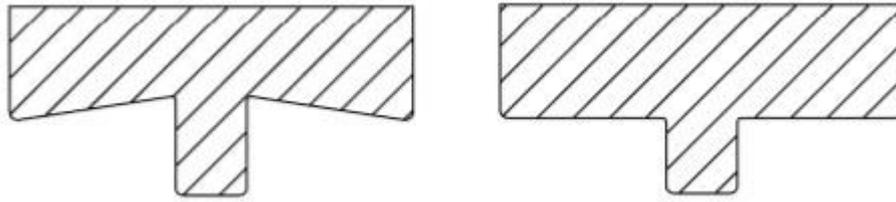


Fonte: Adaptado de MISHRA et al., 2005.

Como observado na Figura 4, o perfil de suporte 1 é o mais utilizado nos estudos do processo de FSW, é composto por uma superfície côncava ou plana, com intenção de reduzir o volume de material expulso do suporte. O suporte 2 possui várias superfícies escalonadas concêntricas, que resultam em um volume negativo no suporte, com mesma finalidade do anterior, reduzir o volume de material expelido pelo suporte, o suporte 3 possui superfície plana, porém com presença de reentrâncias negativas em formato de espiral, absorvendo o material que seria expelido formando uma pequena rebarba. Os suportes 4 e 5 possuem uma série de platôs helicoidais e de planos que formam um volume negativo no suporte, de forma a admitir material que seria expelido para fora do suporte e melhorar a qualidade da solda.

Na Figura 5 é demonstrada a diferença de perfil entre os suportes mais utilizados no estudo de FSW, onde o suporte plano apresenta tendência a expulsar o material durante a solda, enquanto o suporte côncavo, mantém o material expulso pelo pino sob o suporte, reduzindo a probabilidade de surgimento de defeitos no interior da solda (COLLEGROVE, 2005).

Figura 5– Perfil côncavo e plano.



Fonte: Adaptado de MISHRA et al., 2005.

### 2.3.3 Perfil do pino

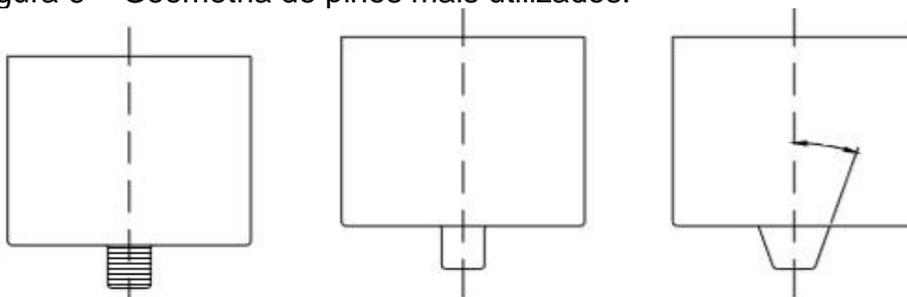
A quantidade de calor e o escoamento do material necessário no processo de união dos materiais são diretamente afetados pela geometria do pino adotada, onde pode impactar também as propriedades mecânicas resultantes na solda.

A deformação plástica e a mistura dos materiais são de responsabilidade da geometria do pino, possuindo uma pequena parcela na quantidade de calor gerada no processo (GUERRA, 2003).

Segundo o estudo realizado por BUFFA (2006), a geometria da ferramenta deve atender certas características, o pino de penetração deve ser décimos de milímetros de comprimento menor que a espessura das chapas assim como o diâmetro do pino deve ser aproximadamente o mesmo que a espessura das chapas e o tamanho do ombro deve ser aproximadamente três vezes maior que o diâmetro do pino.

Atualmente existem diversos modelos de ferramentas utilizadas no processo, variando principalmente a geometria do pino, podendo ser com pino liso, pino roscado, reto ou cônico, entre outros. Na Figura 6 são apresentados alguns tipos de pino utilizados frequentemente no processo.

Figura 6 – Geometria de pinos mais utilizados.



Fonte: Adaptado de BUFFA et al., 2006.

### 2.3.4 Materiais utilizados para ferramenta FSW

A ferramenta durante o processo de união dos materiais pelo processo de FSW é submetida a condições de bastante desgaste devido ao atrito, aquecimento e forças de reação decorrentes da deformação do material. O material selecionado para a fabricação da ferramenta deve atender algumas exigências de acordo com as condições que a ferramenta estará submetida.

Com a repetitividade do processo e para não influenciar nos resultados finais a vida útil da ferramenta é um fator importante a ser levado em consideração, com isso é necessário selecionar de maneira correta o material a ser utilizado para a produção da ferramenta. De acordo com (COLLEGROVE, 2005), o maior desgaste na ferramenta se dá no momento em que ocorre o atrito da mesma com as partes a serem unidas, devido à grande tensão residual envolvida na deformação do material.

Grande parte dos estudos realizados com base na união de materiais por FSW, a ferramenta é constituída do aço ABNT H13, devido a relação custo-benefício, possui maior desgaste quando comparado a outros aços como ABNT M35, a Tabela 1 mostra os parâmetros exigidos para uma ferramenta de H13.

Tabela 1 - Propriedades do Aço ABNT H13.

<b>Propriedades</b>	<b>ABNT H13</b>
Dureza após Têmpera (HRC)	51 - 53
Modulo Elasticidade (GPa)	210
Impacto Charpy (J)	22
Abrasão - ASTM G65 (mm <sup>3</sup> )	460

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2009.

### 2.4 Liga de alumínio 6060 T5

O alumínio é um elemento da tabela periódica, da família dos metais. Seu ponto de fusão é de 660°C, ele é reconhecido pela sua resistência a corrosão e densidade relativamente baixa, de acordo com suas características, sua aplicação é bastante ampla em diversos setores industriais.

O alumínio puro possui baixa resistência mecânica e é bastante dúctil, devido a isso foi necessário a adição de alguns elementos de liga para contornar este problema. Estes elementos de ligas podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Ligas de alumínio e seus elementos.

<b>Ligas</b>	<b>Elementos de liga</b>
1XXX	Nenhum ( $\geq 99,00\%$ Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg e Si
7XXX	Zn
8XXX	Outros elementos

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2009.

A classificação dos alumínios pode ser feita também de acordo com os processos termomecânicos envolvidos no material, como têmperas.

Os tratamentos termomecânicos e suas têmperas estão contidos no ANEXO.

A liga de alumínio utilizada no processo é a 6060, formada de alumínio, magnésio e silício forjado da série 6XXX como mostra a Tabela 2. O material possui boas características de soldabilidade, porém não é indicado para uso na fundição (SANTOS,2009). Na Tabela 3 são identificados a propriedades do Alumínio 6060.

Tabela 3 – Propriedades do alumínio 6060 T5.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Limite de resistência a tração (MPa)	145
Limite de resistência a tração (MPa)	105
Alongamento mínimo (%)	8
Dureza Brinel (HB)	66

Fonte: Adaptado de ALCOA, (2010).

## 2.5 Cobre eletrolítico C110

As ligas mais utilizadas em diversos setores das indústrias, a nível mundial, é a liga de cobre perdendo apenas para aços e alumínio devido ao custo relativo e tendo como vantagem uma fácil fabricação, boa resistência a corrosão e elevada condutividade elétrica e térmica. Essas características aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga fazem do cobre uma liga com amplo campo de aplicação, sua temperatura de fusão é de 1083 °C (INFOMET,1998).

A Tabela 4 mostra as classificações de cada liga.

Tabela 4 – Classificação das ligas de cobre.

Série CDA/ASTM	Tipo de liga
C 1XX	Cobre comercialmente puro e cobre ligado
C 2XX	Latão binário (cobre-zinco)
C 3XX	Latão com chumbo (Cu-Zn-Pb)
C 4XX	Latão com estanho (Cu-Zn-Sn)
C 5XX	Bronzes (cobre-estanho, com e sem fósforo)
C 6XX	Cobre-alumínio, cobre silício
C 7XX	Cuproníquel e alpaca

Fonte: Adaptado de INFOMET, (1998).

A liga adotada no processo é o cobre eletrolítico C110, apresentando teor de Oxigênio entre 0,02% e 0,07% e 99,95% de cobre puro. Tem como característica a baixa ductilidade, a qual garante trabalhar de maneira facilitada durante os processos de fabricação (INFOMET,1998).

Devido a essas características esse cobre ligado pode ser usado na construção mecânica e nas indústrias elétricas, sendo um excelente condutor, é usado em processos de soldagem e brasagem. A Tabela 5 demonstra as características apresentadas pelo material (INFOMET,1998).

Tabela 5 – Características do cobre eletrolítico C110.

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>
Faixa de temperatura de recozimento	475-750 °C
Faixa de temperatura para trabalho a quente	750-875 °C
Conformabilidade a quente	Excelente
Conformabilidade a frio	Excelente
Resistência a tração	220 MPa

Fonte: Adaptado de INFOMET, 1998.

### **3 METODOLOGIA**

Nesta seção serão demonstrados e explicados os procedimentos utilizados na realização da parte experimental do trabalho, apresentando os métodos utilizados no processo de soldagem, tendo como finalidade a obtenção de resultados que possam contribuir à linha de estudo.

#### **3.1 Materiais e equipamentos**

##### **3.1.1 Equipamento**

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem CNC ROMI D 800, por não haver disponibilidade de uma máquina específica para este tipo de solda, o centro de usinagem apresenta elevada potência, dificultando o travamento da ferramenta, o que poderia prejudicar o acabamento final da junta. O centro possui como características: as regulagens de posição, velocidade de rotação e avanço, foi elaborado um programa com os parâmetros e variáveis desejados para a realização da solda. A Figura 7 mostra o equipamento utilizado.

Figura 7– Fresadora CNC ROMI D800.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2 Dispositivo de fixação

Para o processo de soldagem ocorrer de forma satisfatória é necessário a fixação da junta para que não ocorra descontinuidades devidas ao deslocamento de alguma das chapas, para isso foi projetado e elaborado um dispositivo cuja função é fixar ambas as partes, onde o mesmo possui um ângulo de inclinação, uma vez que o centro de usinagem não disponibiliza deste parâmetro. Algumas adaptações foram necessárias para que fosse possível utilizar esta espessura e comprimento de chapas, realizando assim a solda sem imperfeições. A Figura 8 mostra o dispositivo projetado.

Figura 8– Dispositivo de fixação.



Fonte: Figura ilustrativa do dispositivo.

### 3.1.3 Metal de base

Foi utilizado como metal de base para realizar a junta de topo, uma chapa de alumínio 6060 T5 e outra chapa de cobre C110, ambas de fornecimento nacional. As

chapas foram cortadas com mesmas dimensões de 293mm X 31,75mm (comprimento x largura), com as extremidades limadas e superfície limpa com álcool isopropílico, afim de evitar problemas nas juntas. A Figura 9 mostra as dimensões destas chapas.

Figura 9 – Material base da solda.



Fonte: Próprio autor.

### 3.1.4 Ferramenta

Quatro geometrias de ferramentas FSW foram selecionadas para a realização dos experimentos, onde elas são diferenciadas pela combinação entre a forma das duas partes principais, pino e suporte

As ferramentas foram fabricadas em aço H13, onde alguns critérios foram levados em consideração. Os parâmetros com mais importância para a fabricação foram o formato do pino de penetração e o formato do ombro. A Figura 10 mostra a ferramenta utilizada neste projeto.

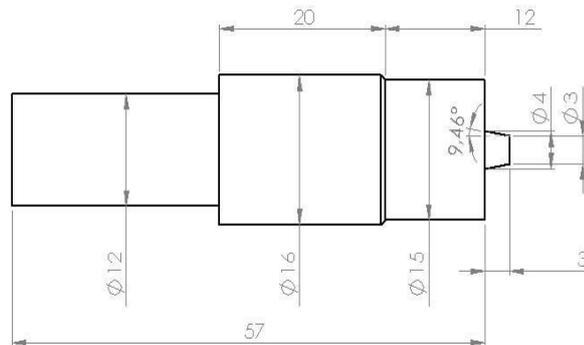
Figura 10 – Ferramenta de solda.



Fonte: Próprio autor.

Esta ferramenta passou pelos processos de têmpera e revenido resultando em uma dureza aproximada de 54HRC. As dimensões da ferramenta estão demonstradas na Figura 11.

Figura 11 – Dimensões da ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

A penetração da ferramenta foi de 3 mm, o mesmo comprimento do pino, pois o ombro precisa estar em contato com o material para que ocorra a mistura e por assim o forjamento do cordão de solda.

### 3.2 Sistema de organização das amostras

Para uma organização melhor, adotamos uma nomenclatura para as placas de soldas em função da geometria da ferramenta utilizada, onde os corpos de prova possuem a primeira letra referente à placa utilizada para a confecção dos mesmos, seguida do número sequencial do corpo de prova. A Tabela 6 mostra a relação entre a nomenclatura das placas e as ferramentas adotadas.

Tabela 6 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

Placa	Pino	Ombro
A	Cônico	Plano
B	Cônico	Côncavo
C	Hexagonal	Plano
D	Cilíndrico	Plano
E	Cilíndrico	Côncavo

Fonte: Próprio autor.

### **3.3 Procedimentos experimentais**

#### **3.3.1 Parâmetros de soldagem**

Segundo estudos já realizados na área do experimento, onde o Fernando Hendges realizou os primeiros testes, obtivendo uma posição inicial ideal para a ferramenta, onde foram gerados os melhores resultados. Foi deslocado a ferramenta 1mm para dentro do alumínio em relação ao centro da ferramenta e das chapas, resultando em uma melhor mistura, com a soldagem sendo realizada do alumínio para o cobre. (HENDGES, 2017).

Os parâmetros que possuem maior influência na qualidade da junta, além da geometria selecionada para a ferramenta, são a rotação e o avanço da ferramenta, onde o tema de sua monografia, Fernando Hendges estudou os principais parâmetros para obter uma melhor qualidade de solda, onde o mesmo utilizou e avaliou velocidades de rotações variando entre 500 a 2000 rpm, duas velocidades de avanço, 10 e 20 mm/min e um ângulo de inclinação de 3°, obtido através da confecção do suporte para as chapas a serem soldadas. (HENDGES, 2017).

#### **3.3.2 Ensaios**

Os ensaios classificam se um processo foi bem executado ou não, podendo também avaliar a qualidade relacionada aos valores obtidos, comprovando e qualificando de maneira efetiva os resultados da união dos materiais selecionados.

A inspeção visual permite a identificação e a seleção das juntas de melhor qualidade e acabamento superficial, as quais são levadas para os próximos ensaios afim de um estudo com maior precisão, onde foi realizado o ensaio de tração e posteriormente a macrografia da solda, a microdureza localizada ao longo dos cordões de solda é outro parâmetro que permite classificar e identificar a variação no processo ao se alterar a geometria da ferramenta.

### 3.3.2.1 Acabamento superficial

Uma das etapas mais importantes do processo de solda por fricção, onde os cordões de solda são selecionados visualmente para prosseguir para a próxima etapa, onde são extraídos corpos de provas para ensaio de tração, microdureza e posteriormente macrografia. A Figura 12 a seguir mostra os cordões de solda selecionados e descartados decorrente de seu acabamento visual.

Figura 12 – Cordão selecionado x descartado.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração tem finalidade de qualificar e verificar a qualidade do processo, onde é aplicada uma carga em um corpo de prova até que ocorra a ruptura do mesmo. Na Figura 13 é ilustrado o corpo de prova que será confeccionado, o mesmo segue a indicação de dimensões da NBR6892:200, referente à solda de materiais metálicos sob efeito de temperatura ambiente.

Figura 13 – Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio foi realizado no equipamento SHIMADZU AGS-X, demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Dispositivo SHIMADZU.



Fonte: Próprio autor.

### **3.3.2.3 Macrografia**

O Processo consiste em identificar e analisar a qualidade da mistura dos materiais através das zonas de soldagem na peça e ainda, avaliando possíveis parâmetros que possam ter influenciado na homogeneidade dos materiais, como defeitos, vazios e descontinuidades que possam ter ocorrido no momento da soldagem.

### **3.3.2.4 Microdureza**

Processo no qual podemos analisar a dureza que a junta apresenta em determinado ponto em estudo, onde a qualidade da mistura dos materiais varia ao longo do comprimento do cordão de solda, avaliada através da seção transversal da solda descartando seções com trincas, vazios ou outra espécie de defeitos. O equipamento utilizado está demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Dispositivo BUEHLER micromet 6010.



Fonte: Próprio autor.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Confeção da ferramenta

Foram confeccionadas 6 ferramentas, todas confeccionadas e tratadas dentro da própria universidade, onde foram variados os pinos e ombros com intuito de identificar a variação das propriedades mecânicas de cada ferramenta individualmente em relação ao cordão de solda. A Figura 16 ilustra a confecção das ferramentas junto ao torno mecânico da universidade.

Figura 16 – Confeção das ferramentas.



Fonte: Próprio autor.

Foram adotadas ferramentas com pinos nos formatos cilíndricos, cônicos e hexagonais, onde o ombro foi de face plana e com uma concavidade. A Figura 17 demonstra as geometrias escolhidas para as ferramentas.

Figura 17 – Geometria das ferramentas.



Fonte: Próprio autor.

O material adotado para confecção da ferramenta foi o Aço ferramenta ABNT H13, a temperatura relacionada para a realização da têmpera e do revenimento foram obtidas através do catálogo dos aços ferramentas da empresa Favorit Aços Especiais, onde o catálogo completo encontra-se na seção de ANEXOS desta monografia.

A temperatura para a têmpera foi de 1040°C e seu resfriamento feito à óleo, posteriormente foram realizados dois revenimentos de 2 horas cada, na temperatura de 550°C para uma dureza de aproximadamente 54 HRC. A Figura 18 mostra os valores utilizados de acordo com o catálogo da empresa.

Figura 18 – Catálogo Aços Ferramentas Favorit.

AÇOS FERRAMENTAS																			
Equivalências		Composições Químicas Médias (%)									Estado normal de fornecimento	Tratamentos Térmicos							
AISI/SAE	WERKSTOFF N°	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Recozimento (°C)		Dureza (HB)	Têmpera			Revenimento (°C)			
												Têmpera (°C)	Meio	Dureza (HRC)					
AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS																			
M2	1.3343	0,85	0,30	0,30	4,10	5,00	-	2,00	6,10	ESFEROIDIZADO	870/900	Máx. 280	1190/1230	Banho de Sal / Óleo / Ar Soprado	64/66	540/570			
H 13	1.2344	0,40	1,00	0,35	5,15	1,40	-	1,00	-	ESFEROIDIZADO	850/880	Máx. 230	1000/1040	Banho de Sal / Óleo / Ar Soprado	50/56	400 500 550 600 650 700 54 55 54 47 40 32			

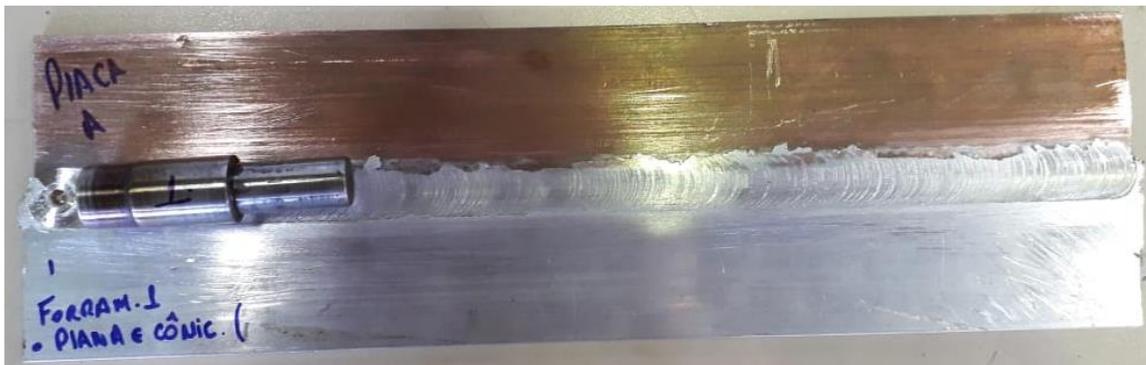
Fonte: Adaptado de Favorit Aços Especiais.

## 4.2 Análise Visual

As soldas realizadas tiveram resultados satisfatórios, onde em uma análise do acabamento superficial selecionamos as melhores soldas para cada geometria de ferramenta para posteriormente serem realizados outros ensaios. De acordo com estudos realizados anteriormente, para uma velocidade de rotação de 1000 rpm e avanço de 10 mm/min, obtivemos uma boa mistura visual de material.

As Figuras a seguir, mostram os melhores cordões de solda para cada geometria de ferramenta selecionada, o cordão de solda tem comprimento de 250 mm e a solda tem sentido da direita para a esquerda.

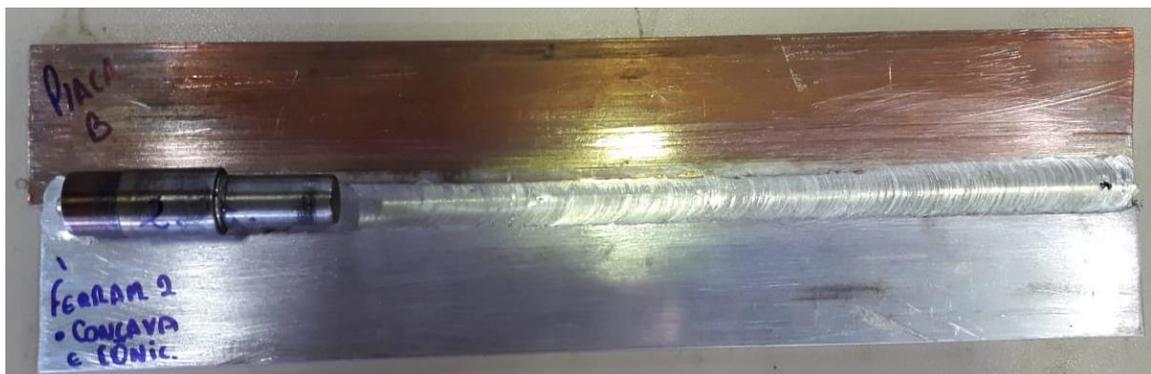
Figura 19 –Resultado cordão obtido com a ferramenta 1.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 19 ilustra o cordão de solda realizado pela ferramenta de formato de pino cônico e ombro plano, a solda não apresentou trincas aparentes, nem problemas no forjamento da mesma, onde a mistura dos materiais demonstra predominância do alumínio.

Figura 20 –Resultado cordão obtido com a ferramenta 2.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 20 é respectiva a ferramenta de pino cônico e ombro com uma concavidade, a solda não apresentou falhas, como trincas aparentes, nem problemas no forjamento do cordão, onde a mistura dos materiais também demonstra uma certa predominância do alumínio.

Figura 21 –Resultado cordão obtido com a ferramenta 3.



Fonte: Próprio autor.

A placa C foi realizada com auxílio da ferramenta de pino hexagonal e ombro plano, visualmente a Figura 21, nos permite denotarmos uma melhor mistura dos materiais, sem a ocorrência de trincas ou falhas no cordão de solda.

Figura 22 –Resultado cordão obtido com a ferramenta 4.



Fonte: Próprio autor.

Já na placa D, a ferramenta adotada foi geometria de pino cilíndrico e ombro plano, visualmente a Figura 22 apresenta boa mistura dos materiais, porém a mesma

teve ocorrência de pequenas falhas no forjamento do cordão, sendo por trincas aparentes ao longo do cordão.

Figura 23 –Resultado cordão obtido com a ferramenta 5.



Fonte: Próprio autor.

Por fim a ferramenta de pino cilíndrico e ombro côncavo, demonstrada na Figura 23, foi a de menor qualidade no acabamento superficial, apresentando diversas imperfeições ao longo do cordão de solda, teve uma mistura aceitável dos materiais, porém o desgaste da ferramenta, entre outros fatores resultaram na ocorrência de diversas trincas na união dos materiais.

### 4.3 Ensaio de tração

Os resultados obtidos através do ensaio de tração tiveram uma variação diretamente ligada à variação da geometria das ferramentas, onde as mesmas apresentaram valores distintos para a máxima carga suportadas axialmente. Como os parâmetros adotados foram os mesmos para todos cordões de solda, onde a única característica alterada foi a geometria da ferramenta, mais em específico do pino e do ombro da ferramenta.

Durante o ensaio podemos identifica que a ruptura dos corpos de prova, ocorreram maioria das vezes na seção do alumínio, onde o mesmo apresenta menor tensão de escoamento em relação ao cobre.

A Figura 24 mostra a ruptura para os primeiros corpos de prova, extraídos da placa A, onde receberam uma preparação na superfície para não ocorrer falhas no processo do ensaio, como escorregamento.

Figura 24 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa A.



Fonte: Próprio autor.

Com base nos dados obtidos no ensaio, sem nenhum caso de escorregamento da amostra, pode-se observar uma variação na carga máxima suportada pelas amostras, onde os valores estão expostos na Tabela 7.

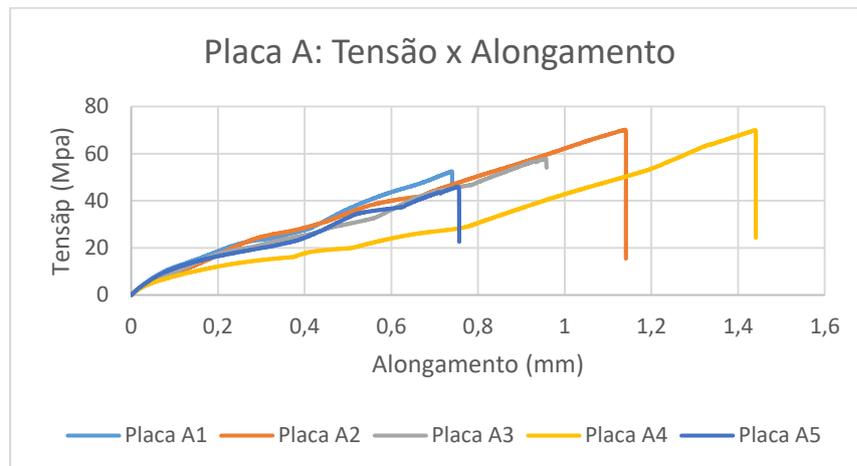
Tabela 7 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

<b>Amostra</b>	<b><math>F_{rupt}</math> [N]</b>	<b><math>\sigma_{rupt}</math> [Mpa]</b>
1	945,47	52,52
2	1262,43	70,13
3	1041,05	57,83
4	1260,47	70,03
5	824,94	45,83

Fonte: Próprio autor.

A Figura 25 mostra o gráfico de tensão x alongamento do primeiro ensaio, onde é demonstrado individualmente a curva para cada amostra da placa A.

Figura 25 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa A.



Fonte: Próprio autor.

As amostras A1 e A5 obtiveram uma tensão inferior em comparação com as outras, as mesmas apresentavam surgimento de vazios no interior do cordão de solda influenciando diretamente no valor da carga suportada, a tensão média das amostras foi de 59,1 Mpa, onde algumas amostras tiveram maior deformação para uma menor tensão de ruptura.

Os corpos de prova para a placa B estão dispostos na Figura 26.

Figura 26 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa B.



Fonte: Próprio autor.

No segundo ensaio não ocorreu nenhum caso de escorregamento do corpo de prova, onde a falha das amostras se teve maioria das vezes na junta e de maneira frágil, os valores obtidos para a Força e tensão de ruptura estão dispostos na Tabela 8.

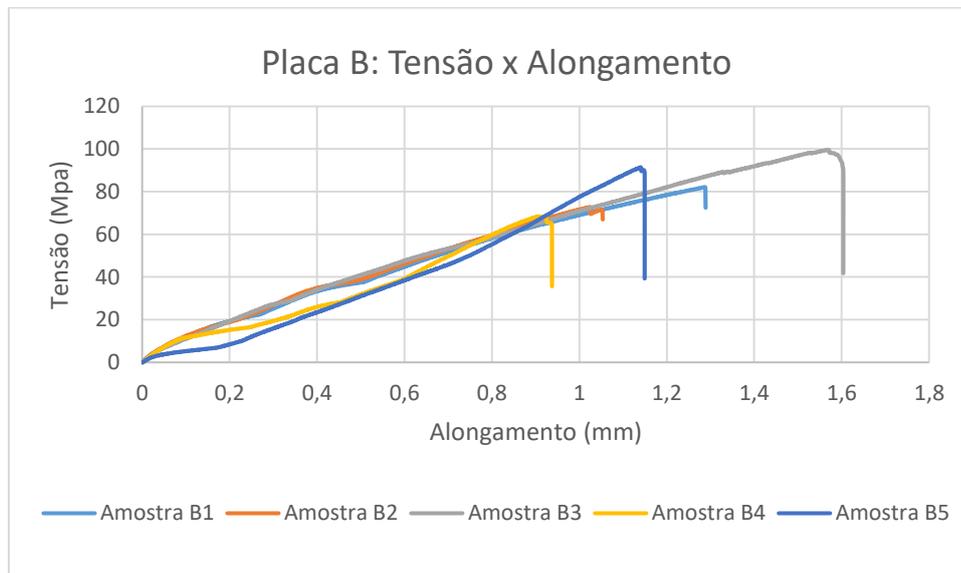
Tabela 8 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

<b>Amostra</b>	<b><math>F_{rupt}</math> [N]</b>	<b><math>\sigma_{rupt}</math> [Mpa]</b>
1	1477,89	82,10
2	1287,45	71,52
3	1791,56	99,53
4	1231,16	68,40
5	1645,41	91,41

Fonte: Próprio autor.

A Figura 27 mostra o gráfico de tensão x alongamento do primeiro ensaio, onde é demonstrado individualmente a curva para cada amostra da placa B.

Figura 27 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa B.



Fonte: Próprio autor.

As amostras B2 e B4 obtiveram uma tensão um pouco inferior em comparação com as outras, porém ambas as amostras ficaram com uma aproximação considerável entre seus valores de tensão, as amostras não apresentavam vazios ou trincas no interior ou na superfície do cordão de solda, a tensão média das amostras foi de 82,60 Mpa, apresentando um acréscimo na tensão suportada em relação às amostras da placa A.

A Figura 28 mostra a decorrente ruptura dos corpos de prova da placa C após a aplicação da carga axial, onde mesmo recebendo uma preparação na superfície ocorreu uma falha por escorregamento em uma das amostras, portanto descartada a amostra.

Figura 28 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa C.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 28 demonstra os corpos de prova para a placa C após a aplicação da carga axial durante o ensaio, sem caso de escorregamento do corpo de prova durante o ensaio da placa C, onde a mesma obteve os maiores valores de carga suportada entre todos ensaios, resultando em uma maior tensão de ruptura suportada, os valores obtidos para a Força e tensão de ruptura estão dispostos na Tabela 9.

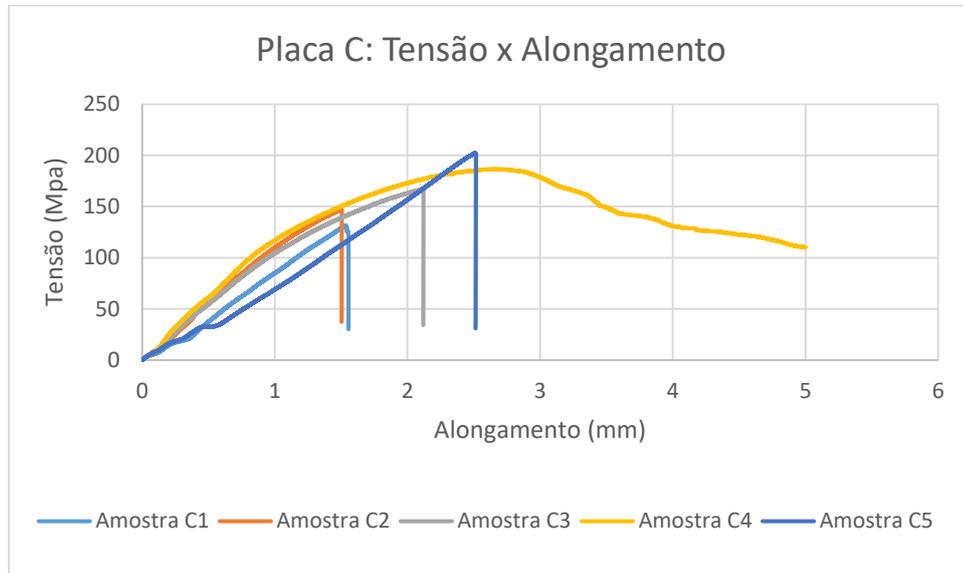
Tabela 9 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

<b>Amostra</b>	<b><math>F_{rupt}</math> [N]</b>	<b><math>\sigma_{rupt}</math> [Mpa]</b>
1	2268,147	126,00
2	2651,856	147,32
3	3001,664	166,75
4	3355,54	186,42
5	3643,556	202,42

Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 mostra o gráfico de tensão x alongamento do primeiro ensaio, onde é demonstrado individualmente a curva para cada amostra da placa C .

Figura 29 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa C.



Fonte: Próprio autor.

As amostras C4 e C5 obtiveram uma tensão relativamente elevada em comparação aos outros corpos de prova, porém ambas as amostras ficaram com uma aproximação considerável entre seus valores de tensão, as amostras não apresentavam vazios ou trincas no interior ou na superfície do cordão de solda, a tensão média das amostras foi de 165,78 Mpa, apresentando um acréscimo na tensão suportada em relação às amostras das outras placas.

A Figura 30 mostra a ruptura dos corpos de prova da placa D após a aplicação da carga axial, onde a mesma recebeu uma preparação na superfície para evitar a ocorrência de falha por escorregamento das amostras

Figura 30 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa D.



Fonte: Próprio autor.

No ensaio da placa D, não ocorreu nenhum caso de escorregamento do corpo de prova, onde a falha das amostras se teve de maneira frágil, os valores obtidos para a Força e tensão de ruptura estão dispostos na Tabela 10.

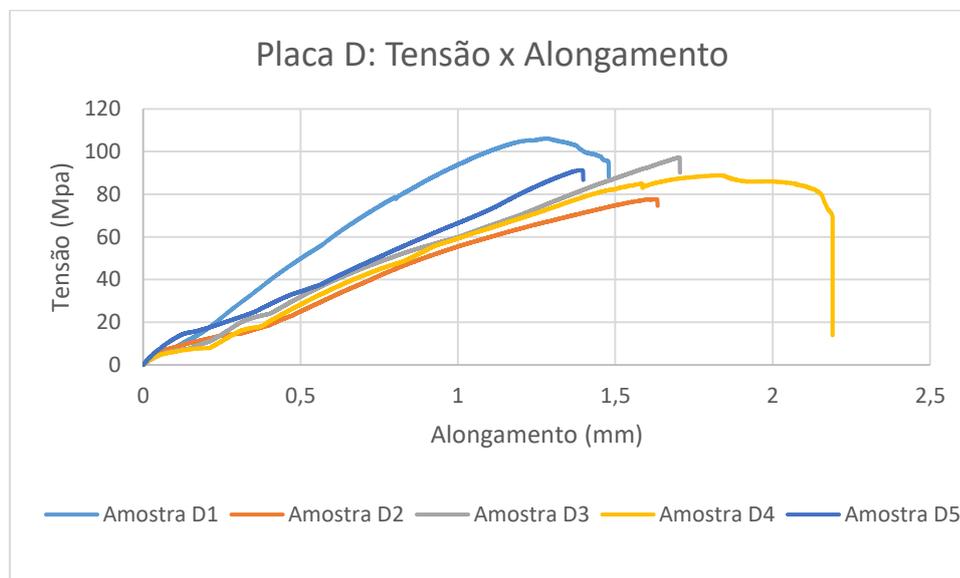
Tabela 10 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

Amostra	$F_{rupt}$ [N]	$\sigma_{rupt}$ [Mpa]
1	1909,70	106,09
2	1396,99	77,61
3	1750,53	97,24
4	1547,50	85,97
5	1641,17	91,18

Fonte: Próprio autor.

A Figura 31 mostra o gráfico de tensão x alongamento do primeiro ensaio, onde é demonstrado individualmente a curva para cada amostra da placa D.

Figura 31– Corpos de prova do ensaio de tração da placa D.



Fonte: Próprio autor.

As amostras não obtiveram uma tensão relativamente elevada em comparação aos outros corpos de prova, porém ambas as amostras ficaram com uma aproximação considerável entre seus valores de tensão, algumas amostras apresentavam

propagações de trincas no interior ou na superfície do cordão de solda, a tensão média das amostras foi de 91,62 Mpa.

A Figura 32 mostra por fim a decorrente ruptura dos corpos de prova da última placa após a aplicação da carga axial, onde a mesma recebeu uma preparação na superfície para evitar a ocorrência de falha por escorregamento das amostras.

Figura 32 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa E.



Fonte: Próprio autor.

Com base nos dados obtidos no ensaio, sem nenhum caso de escorregamento da amostra, pode-se observar uma variação na carga máxima suportada pelas amostras, onde os valores estão expostos na Tabela 11.

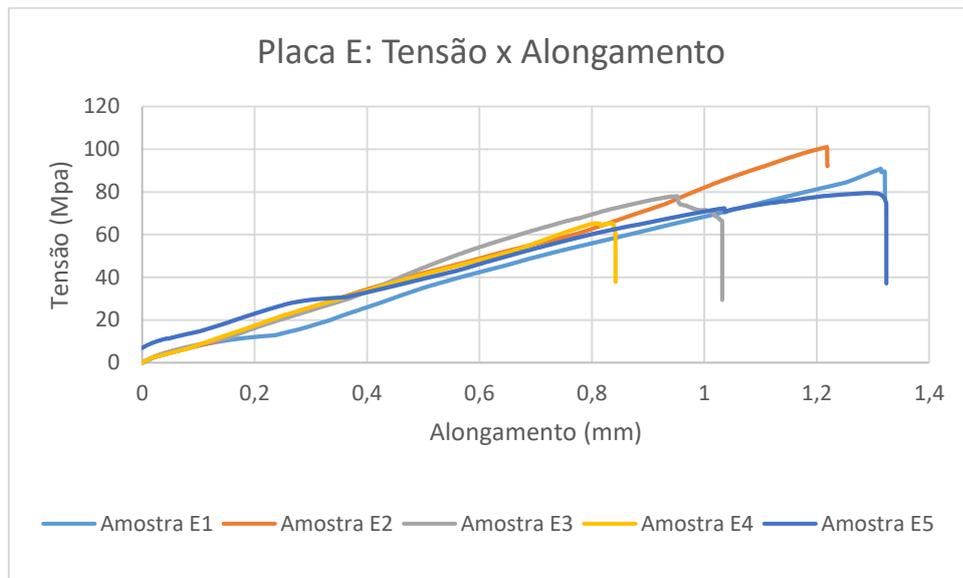
Tabela 11 – Relação nomenclatura adotada x ferramentas.

<b>Amostra</b>	<b><math>F_{rupt}</math> [N]</b>	<b><math>\sigma_{rupt}</math> [Mpa]</b>
1	1614,19	89,67
2	1819,09	101,06
3	1404,58	78,03
4	1175,97	65,33
5	1430,97	79,49

Fonte: Próprio autor.

A Figura 33 mostra o gráfico de tensão x alongamento do primeiro ensaio, onde é demonstrado individualmente a curva para cada amostra da placa E.

Figura 33 – Corpos de prova do ensaio de tração da placa E.



Fonte: Próprio autor.

As amostras praticamente obtiveram a mesma curva de inclinação, ou seja, não houve variação considerável durante os ensaios, ambas as amostras ficaram com uma aproximação de seus valores de tensão, algumas amostras possuíam possíveis trincas no interior e na superfície do cordão de solda, a tensão média das amostras foi de 82,72 Mpa, valor semelhante as amostras da placa B.

Com os valores determinados para cada placa individualmente, onde os valores para os desvios padrões e tensões médias estão presentes na Tabela 12.

Tabela 12 – Relação desvio padrão x tensão média.

	Placa A	Placa B	Placa C	Placa D	Placa E
<i>Tensão mínima</i>	45,83	68,40	126	77,61	65,33
<i>Tensão máxima</i>	70,13	99,53	202,42	106,09	101,06
<i>Tensão média</i>	59,27	82,59	165,78	91,62	82,72
<i>Variância</i>	115,49	172,22	923,17	117,34	179,87
<i>Desvio Padrão</i>	10,75	13,13	30,38	10,83	13,41

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 12, os valores de desvio padrão apresentaram certa variação quando comparados as placas em si, isso ocorre por conta de uma certa dispersão nos valores suportados pelas amostras de cada placa, sendo as mesmas extraídas de diferentes seções ao longo do cordão de solda na respectiva placa,

podendo algum corpo de prova ter alguma trinca ou fricção interna comprometendo os valores da amostra, placas A e B apresentaram vazios no interior do cordão de solda quando comparado as placas C e D, onde a solda se comportou de forma contínua do início ao fim, sem presença de imperfeições significantes, a amostra C teve um maior desvio padrão de acordo com a dispersão dos valores suportados por cada corpo de prova. Os valores de tensões médias obtidas para cada placa, variando a geometria da ferramenta, esta ilustrada na Tabela 12, para identificar a eficiência das propriedades resultantes da união dos materiais comparamos aos ensaios realizados por Wiedenhöft (2018), onde seus resultados estão relacionados as propriedades mecânicas das ligas puras de alumínio (AA6060-T5) e cobre (ASTM B110). A Tabela 13 mostra os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas das ligas.

<b>Material</b>	<b>Limite resistência (MPa)</b>	<b>Limite escoamento (Mpa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Cobre	320,67	318,31	20,01
Alumínio	197,42	155,37	16,22

Fonte: Adaptado de Wiedenhöft (2018).

Na Tabela 14 estão demonstrados os valores para uma tensão média e a proporção em que a junta satisfaz a resistência de cada liga base no seu estado individual, ou seja, no seu estado puro, visando identificar a ferramenta que obteve uma melhor eficiência nos ensaios.

Tabela 14 – Eficiência das propriedades mecânicas obtidas.

	<i>Tensão média</i> [MPa]	<i>Eficiência mecânica</i> <i>em relação ao</i> <i>Alumínio [%]</i>	<i>Eficiência mecânica</i> <i>em relação ao</i> <i>Cobre [%]</i>
Placa A	59,27	30,02	18,48
Placa B	82,59	41,83	25,76
Placa C	165,78	83,98	51,69
Placa D	91,62	46,41	28,57
Placa E	82,72	41,90	25,80

Fonte: Próprio autor.

A placa C, sob influência da ferramenta de pino hexagonal e ombro plano, teve uma tensão média de 165,78 Mpa, o valor obtido nos ensaios para tensão média equivale a 83,98% do limite de resistência mecânica do alumínio e 51,69% da resistência mecânica do Cobre.

#### 4.4 Macrografia

De acordo com as amostras realizadas pelo processo de solda por fricção, foram realizados cortes transversais nas mesmas, a fim de identificar a macrografia formada, identificando e analisando a mistura dos materiais e por assim caracterizando as regiões de solda decorrentes, avaliando possíveis defeitos e descontinuidades que possam ter ocorrido no momento da soldagem, como vazios e outros.

Algumas amostras apresentaram imperfeições como vazios situados durante o cordão de solda, onde a mistura dos materiais não se teve de forma esperada, são vários os fatores que podem ser responsáveis por tal fenômeno, como algum parâmetro que necessitaria ser ajustado ou até mesmo um desgaste na ferramenta utilizada.

Todas amostras foram realizadas sob uma velocidade de rotação de 1000 rpm e um avanço de 10 mm/min, com a amostra da placa A finalizada, após passar por uma preparação, podemos identificar a região de solda na Figura 34.

Figura 34 – Macrografia para a placa A.

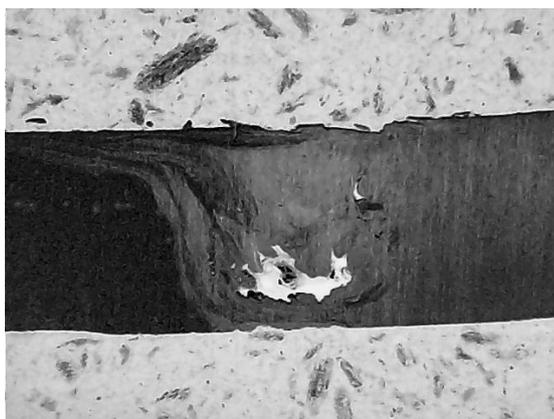


Fonte: Próprio autor.

Podemos observar que a solda da placa A apresentou uma falta de material na parte inferior do cordão de solda, são vários os fatores que podem ter comprometido o mesmo, como desgaste na ferramenta, algum parâmetro de maneira inadequado para o forjamento do cordão de solda, a mistura do material se teve de maneira não satisfatória, onde os valores para força e tensão de ruptura podem ter sido comprometidos pela presença do vazio no interior da solda.

A Figura 35 mostra como ficou a mistura dos materiais, onde um filtro para a macrografia foi utilizado afim de uma identificação de maneira mais clara.

Figura 35 – Macrografia com filtro para a placa A.



Fonte: Próprio autor.

Na placa B podemos identificar um vazio um pouco menor quando comparado à placa A, assim como no primeiro caso, pode ter influência direta nas propriedades da união, comprometendo a tensão e força de ruptura nos ensaios de tração, podendo ser

comprovada relacionando os valores obtidos nos ensaios para ambas as placas, a Figura 36 mostra como ficou a mistura dos materiais e a presença do vazio.

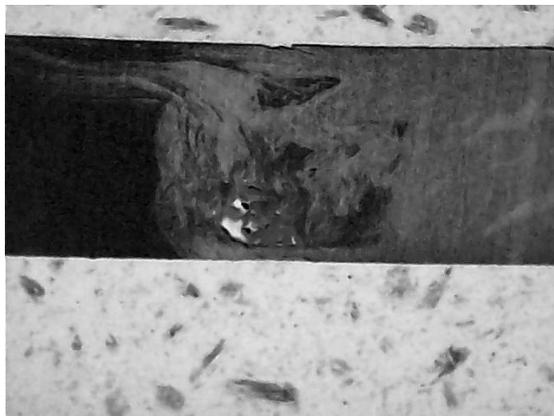
Figura 36 – Macrografia para a placa B.



Fonte: Próprio autor.

Para identificar de melhor maneira, também utilizamos o filtro que auxilia na percepção das regiões da solda, demonstradas na Figura 37.

Figura 37 – Macrografia com filtro para a placa B.



Fonte: Próprio autor.

A placa C em relação propriedades foi a que suportou maiores cargas axiais nos ensaios apresentando valores significantes quando comparados aos ensaios com materiais puros, isso se deve a boa mistura dos materiais durante a solda, a Figura 38 e 39 mostram a macro da união, onde a amostra teve uma pressão de ombro essencial para um forjamento satisfatório do cordão de solda.

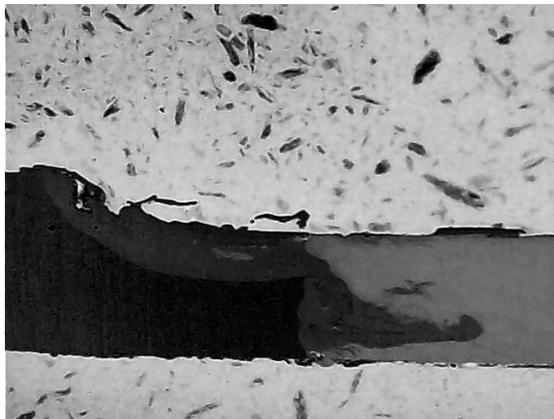
Figura 37 – Macrografia para a placa C.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 39 é exposto a pressão do ombro da ferramenta, o filtro adotado permite identificar de maneira mais clara a região de solda.

Figura 39 – Macrografia com filtro para a placa C.



Fonte: Próprio autor.

Na placa D, podemos identificar na Figura 40 a pressão do ombro durante o processo de solda, onde a mesma apresentou uma boa mistura dos materiais ao longo do processo, apresentando apenas uma pequena trinca internamente o que pode ter comprometido os valores dos ensaios e as propriedades obtidas da solda.

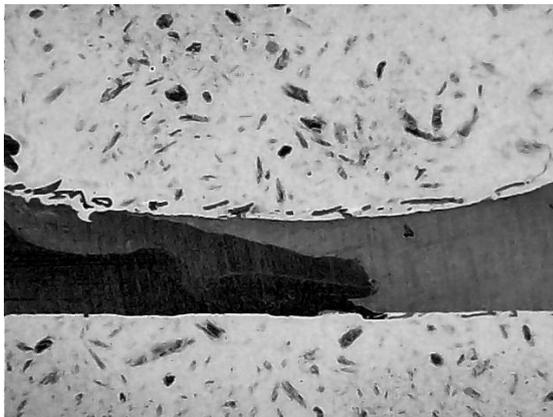
Figura 40 – Macrografia para a placa D.



Fonte: Próprio autor.

Com o filtro utilizado conseguimos identificar melhor a área de pressão do ombro e da mistura, assim como a pequena falha no interior da solda, demonstradas na Figura 41.

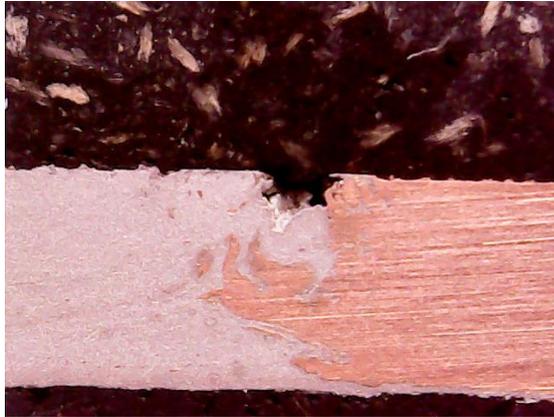
Figura 41 – Macrografia com filtro para a placa D.



Fonte: Próprio autor.

Na última placa onde realizamos a solda, ocorreram uma serie de trincas superficiais e no interior, podendo ter influência nos valores obtidos em outros ensaios, a Figura 42 mostra a região de solda, a mistura dos materiais e a presença de um vazio na superfície da solda.

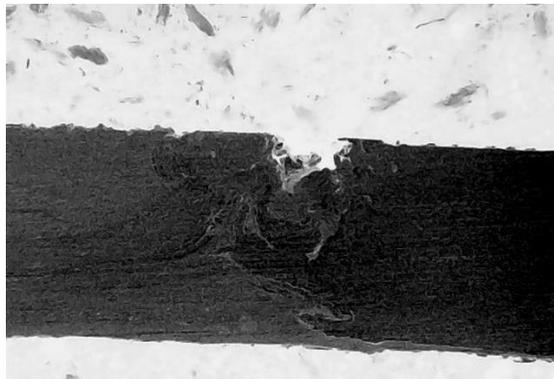
Figura 42 – Macrografia para a placa E.



Fonte: Próprio autor.

Como não foi possível identificar como ocorreu a mistura dos materiais na figura anterior, utilizamos um filtro com tons mais escuros que possibilita uma melhor identificação dos materiais na região de solda, assim como a imperfeição apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Macrografia com filtro para a placa E.



Fonte: Próprio autor.

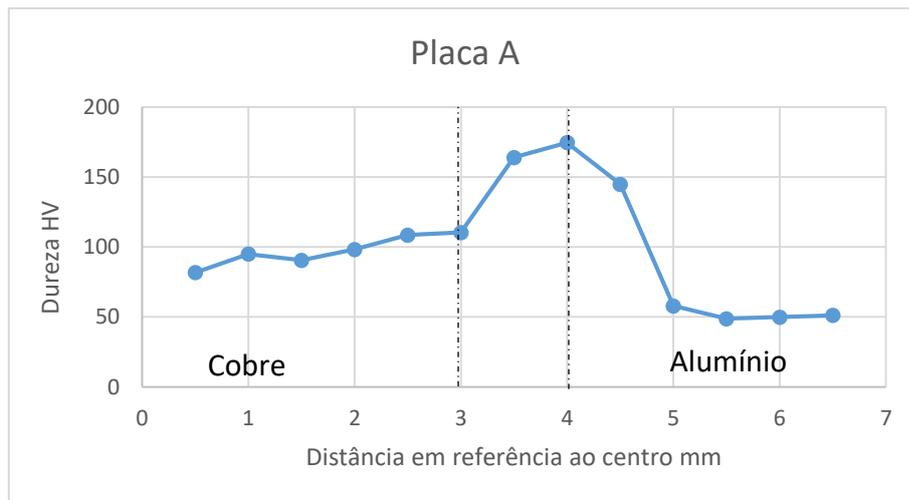
#### 4.5 Microdureza

Conforme o estudo de *Wang et al.* Sobre as propriedades ancoradas ao atrito no processo de solda por fricção entre alumínio e cobre, realizou-se o ensaio de microdureza na seção transversal do cordão de solda, afim de avaliar e mapear as diferentes durezas ao longo das regiões de solda, variando conforme nos afastamos do centro, no caso a região de mistura dos materiais, conhecida também por *nugget*.

A carga adotada foi de 200g sobre um tempo de aplicação de 10s, os espaçamentos de cada ponto de medição foram de 0,5mm para uma melhor identificação da variação dos valores de dureza.

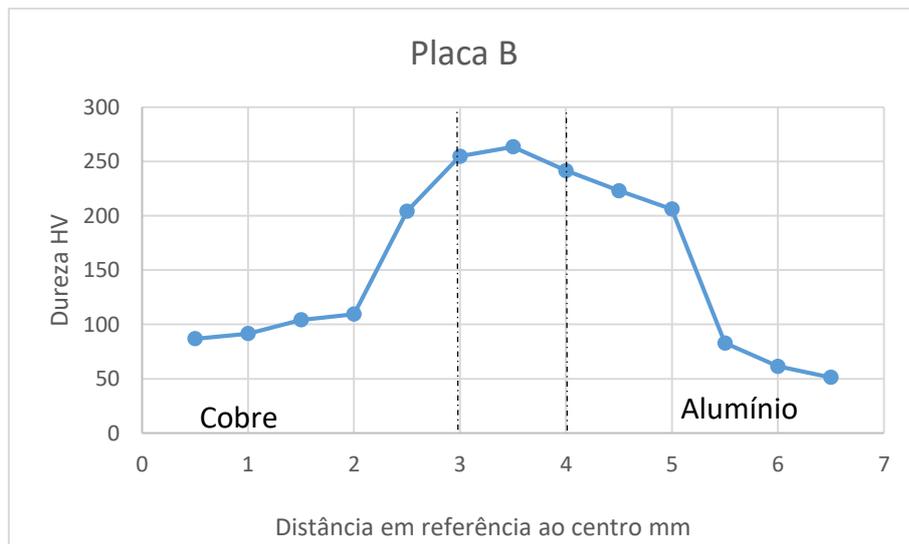
Das Figuras 44 a 48 podemos identificar os perfis de dureza ao longo de uma linha na seção transversal da solda.

Figura 44 – Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa A.



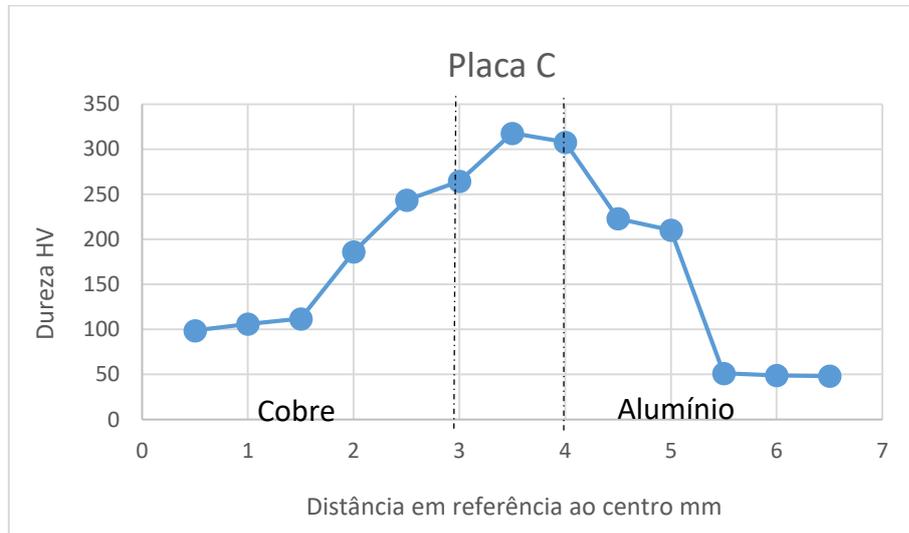
Fonte: Próprio autor.

Figura 45 – Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa B.



Fonte: Próprio autor.

Figura 46 – Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa C.



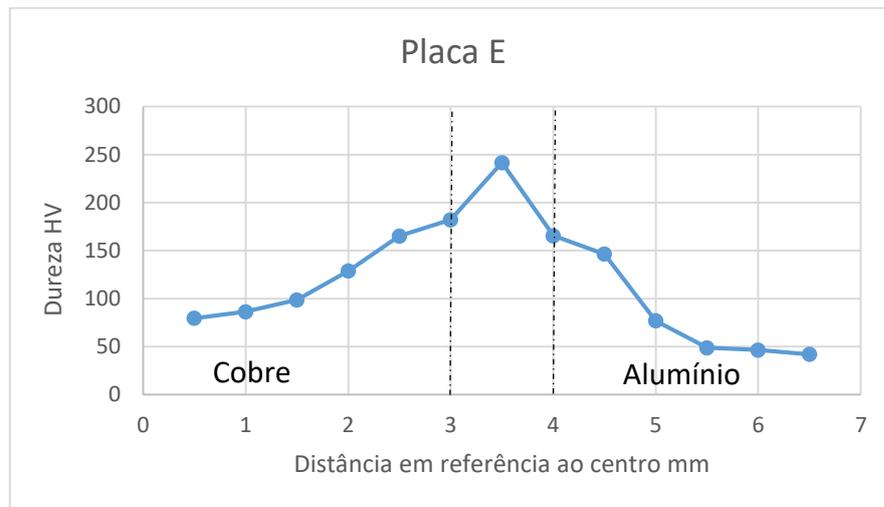
Fonte: Próprio autor

Figura 47 – Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa D.



Fonte: Próprio autor

Figura 48 – Microdureza na seção transversal do cordão de solda da placa E.



Fonte: Próprio autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na confecção das ferramentas, os tratamentos térmicos foram realizados segundo o catálogo de aços especiais da Favorit, onde o valor obtido da dureza da ferramenta foi satisfatório quando comparado a bibliografia adotada com a referência, mesmo assim foi identificada um certo desgaste nas mesmas, a parte do pino responsável pela mistura dos materiais foi a parte que mais apresentou desgastes ao longo das operações, esse desgaste da ferramenta durante a penetração e mistura dos materiais pode ser um dos principais responsáveis pelo surgimento de defeitos ao longo do cordão de solda, podendo ser bem identificados durante a análise visual, onde as amostras em si foram satisfatórias por ser um processo inovador e em constante aprimoramento.

Na análise visual as amostras que tiveram um melhor acabamento superficial foram as amostras realizadas pelas ferramentas de pino cônico e hexagonal, onde surgiram imperfeições nas amostras de pino cilíndrico, como propagações de trincas internas e externas no cordão de solda, as diferenças entre os cordões de solda para cada ferramenta foram significativas, para fins de comparação foram levadas para ensaios de tração, macrografia e microdureza ao longo da seção transversal do cordão de solda.

Os resultados do ensaio de tração foram bastante distintos quando analisamos a mudança de ferramenta para a realização das soldas, o ensaio possibilita analisar qual solda suporta a maior carga axial, os corpos de prova elaborados pela ferramenta hexagonal foram muito superiores às outras amostras, chegando a suportar aproximadamente 3600 N, em torno de 360 Kg em forças axiais, resultado considerado

satisfatório comparado a estudos já realizados na área, os ensaios da ferramenta cônica não foram de certa forma satisfatórios devido aos valores baixos para o rompimento do corpo de prova, isso se deve decorrente da presença de vazios no interior das soldas comprometendo por assim as cargas suportadas do ensaio, suportando em torno de 1400 N (Aprox. 140 Kg), por fim a ferramenta de pino cilíndrico suportando uma carga em torno de 1900 N, aproximadamente 190 Kg.

A seção de macrografia foi realizada a partir de amostras transversais dos cordões de soldas de ambas ferramentas, onde foi necessária uma câmera especial para que a mistura dos materiais fosse identificada de maneira correta, o uso de um filtro possibilitou a identificação e análise de como a mistura dos materiais foi realizada, as amostras das placas C e D, das ferramentas cilíndricas e hexagonais, foram as que tiveram uma melhor avaliação, apresentando uma pressão de ombro superior as outras amostras, o que pode ter contribuído para os valores obtidos em outros testes, as placas A e B tiveram a presença de vazios no interior das soldas enquanto a placa E, e teve a presença de trincas na superfície.

A microdureza ao longo da seção transversal de solda foi realizada, de mesma forma que os outros ensaios, com os equipamentos da própria universidade, onde o conceito do teste era identificar e analisar a dureza Vickers ao longo do cordão, conforme se deslocava da mistura dos materiais, também chamado de nugget, localizado no centro da amostra, em direção ao respectivo material base em estudo, as amostras referentes as placas C e D, de ferramentas de pino hexagonal e cilíndrico, obtiveram durezas superiores a 300 HV, enquanto as amostras das placas B e E em torno de 250 HV, por fim a placa A apresentou 160 HV de dureza na região de mistura dos materiais, esses valores são relacionados a microestrutura final da região de soldas, onde seria necessário um estudo muito mais aprofundado das alterações estruturais devido ao aporte térmico ao realizar a soldagem, como a variação do tamanho de grão, entre outros fatores que podem ser diretamente interligados aos valores obtidos durante os testes.

Sendo assim, podemos dizer que o objetivo principal do trabalho de identificar e analisar a variação da geometria da ferramenta durante o processo de soldagem de dois materiais de propriedades distintas em seu estado sólido foi atingido, os resultados e valores obtidos ao longo dos ensaios foram classificados como

satisfatórios quando comparados à estudos já realizados na área e a bibliográfica complementar adotada, o objetivo secundário de identificar as propriedades obtidas quanto a variação de geometria da ferramenta, se teve de maneira positiva também, uma vez que os melhores parâmetros para análise foram obtidos das amostras realizadas pela ferramenta de pino hexagonal e ombro plano, apresentando boa qualidade de acabamento superficial, absorvendo uma elevada energia de deformação no ensaio de tração, resultando em valores consideráveis quando submetidos a cargas axiais, e por fim tendo uma microdureza na região de solda, ilustrado pela Figura 46, de forma constante em relação ao metal base, ou seja, sem picos abruptos de valores, o que caracteriza a solda de boa qualidade.

### **5.1 Sugestões para estudos futuros**

Para possíveis trabalhos a serem realizados futuramente:

- Uma micrografia adequada sob a região de mistura dos materiais, onde pode-se identificar a regiões de solda de maneira correta e as mudanças da microestrutura dos materiais.
- Estudo dos parâmetros adequados e da influência da temperatura no processo de solda por fricção, analisando um valor adequado para a operação.
- Tratamentos térmicos que influenciem positivamente nos valores obtidos nos ensaios, devido o processo ser inovador e em constante aprimoramento.
- Sugere-se a pesquisa e utilização de ferramenta de geometria diferentes a fim de analisar e estudar o processo e os seus parâmetros resultantes.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALCOA – **Ligas e têmperas de extrusão**. ALCOA Alumínio e Cia, 2010, 52p. Banco de dados disponível em: <[https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo\\_ligas\\_temperas\\_2010.pdf](https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf)>

ASM, 1990, **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**, J.E.Hatch, ASM, Metals Park, USA.

ATTALLAH, M. M.; SALEM, H. G. **Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment**. Materials Science and Engineering A, 391, p. 51–59, 2005.

BUFFA, G.; HUAA, J.; SHIVPURI, R.; FRATINI, L. **Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model**. Materials Science & Engineering, 2006.

COLEGROVE, P. A.; **3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile**. Journal of Materials Processing Technology 169, p. 320–327, 2005.

DAWES, C. J.; THOMAS, W. M. **Development of improved tool design**. TWI – UK, p.10, 1999.

ERICSSON, M.; SANDSTROM, R. **Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG**. International Journal of Fatigue, 25, p. 1379–1387, 2003

FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6**. 2008. 93 p. Dissertação de Mestrado - Processos de fabricação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HENDGES, F.L.; **Análise de uma solda linear de topo por fricção (fsw) entre Alumínio (6060 t5) e Cobre (c110)**, Alegrete, 2017.

MISHRA, R. S. **Friction stir processing technologies**. *Advanced Materials & Process*, 161, p. 5, 2005.

NICHOLAS, E. D. **Friction processing technologies**. *Welding in the World*, 11/12, 2003, v. 47.

TAN, C. W. et al. **Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar AlCu joints produced by friction stir welding**. *Materials and Design*, 51, p. 466-473, 2013.

THOMAS, W. M. et al. **"Friction Stir Butt Welding"** International patent application No.PCT/GB92/02203 and GB patent application No.9125978.8, 6 Dezembro, 1991.

THOMAS, W. M.; DOLBY, R. E. **Friction Stir Welding Developments**. 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19 April 2002, Georgia, USA

WIEDENHÖFT, A.; **Estudo do comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico de juntas sobrepostas dissimilares da liga de Cobre ASTM C110 e de Alumínio AA6060-T5 produzidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) modificado**, Porto Alegre, 2018.

ZHAO, Y.; LIN, S.; WU, L.; QU, F. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy**. *Materials Letters*, 59, p. 2948–2952, 2005.

