

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DJOVANI ZIEGLER GIRARDI**

**ESTUDO PRELIMINAR DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING* DE UMA JUNTA SOBREPOSTA DISSIMILAR DAS LIGAS ALUMÍNIO 6060 T5 E COBRE C110 COM DUPLO RECUO**

**Alegrete  
2015**



**DJOVANI ZIEGLER GIRARDI**

**ESTUDO PRELIMINAR DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING* DE UMA JUNTA SOBREPOSTA DISSIMILAR DAS LIGAS ALUMÍNIO 6060 T5 E COBRE C110 COM DUPLO RECUO**

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

Orientador: Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

Coorientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**Alegrete  
2015**



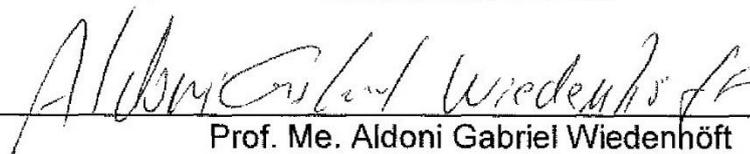
**DJOVANI ZIEGLER GIRARDI**

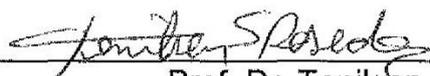
**ESTUDO PRELIMINAR DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO PROCESSO  
FRICTION STIR WELDING DE UMA JUNTA SOBREPOSTA DISSIMILAR  
DAS LIGAS ALUMÍNIO 6060 T5 E COBRE C110 COM DUPLO RECUO**

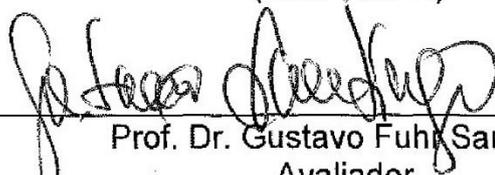
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 23 de janeiro de  
2015.

Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft  
Orientador  
(UNIPAMPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo  
Coorientador  
(UNIPAMPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gustavo Fuhr Santiago  
Avaliador  
(UNIPAMPA)



Dedico este trabalho ao meu pai, Alcides, pelas palavras de sabedoria e confiança; à minha mãe Roseli pelo carinho e dedicação; ao meu irmão Henrique que assim como meus pais foram e sempre serão meus guias, meus exemplos; e dedico à minha namorada, amiga e grande amor, Daiana que me motiva e faz eu querer ser melhor a cada dia.



## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu o dom da vida e permitiu trilhá-la ao lado daqueles que posso contar incondicionalmente e que são os pilares de sustentação: minha família.

Aos meus pais, que me transmitiram valores morais e éticos, carinho e acima de tudo sempre apoiaram minhas decisões e ajudaram na realização das mesmas. É mérito de vocês, Alcides e Rose a concretização não só deste trabalho como da conclusão do curso de engenharia.

À minha namorada, minha paixão e grande amor Daiana pela compreensão e paciência durante estes tempos de muita dedicação aos estudos. Este trabalho de conclusão é apenas o começo de uma vida profissional que proporcionará diminuir as distâncias. Te conhecer trouxe felicidade em meio ao estresse e ansiedade na espera da conclusão deste curso.

Ao meu irmão Henrique pela amizade de toda vida, você é um exemplo de irmão mais velho.

Aos professores Aldoni Wiedenhöft e Tonilson Rosendo pela orientação neste trabalho. A realização deste não seria possível sem a sabedoria e conhecimento destes dois grandes mentores.

Ao professor Fladimir Fernandes por dedicar parte do seu tempo esclarecendo dúvidas e transmitindo seu conhecimento técnico da metodologia científica.

Aos profissionais dos laboratórios de engenharia de Alegrete: Dieson Fantineli, Marcelo Oliveira, Janice Facco e Gean Ondra, por auxiliarem em todas as atividades práticas, viabilizando a execução dos experimentos e ensaios.

Agradeço ao Cleber Parciello pela ajuda neste trabalho, me auxiliando a entender certos fenômenos e a procurar soluções para os problemas enfrentados.

Agradeço ao meu grande amigo Guilherme Domeneghi pela parceria e amizade que serviram para amadurecimento durante esta jornada da faculdade.

Ao professor Marco Tier pelas oportunidades de aprendizado que serviram ao meu crescimento acadêmico e pessoal.

A todos os amigos e colegas de curso pela ajuda e amizade, em especial a Erick Medeiros, Alessandro Nunes e Vitor Arrussul.

Obrigado a todos – colegas, professores, amigos – que contribuíram diretamente e indiretamente para minha formação acadêmica e finalização deste trabalho, ponto que marca o começo de uma carreira profissional que busco trilhá-la de forma ética e moral.



“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin



## RESUMO

A soldagem no estado sólido *FSW* (*Friction Stir Welding*) consiste em um processo desenvolvido primordialmente para a aplicação em ligas de Alumínio de baixa soldabilidade. Recentemente, estudos voltados na utilização deste método na união de juntas de materiais dissimilares demonstraram a versatilidade deste processo ao se obter uniões metalúrgicas entre metais com propriedades distintas. As características das ligações químicas envolvidas no método *FSW* ocasionadas pela elevação da temperatura através da fricção mecânica e mistura plástica dos materiais, resultam na aplicação do *FSW* em basicamente todos os materiais que apresentem plasticidade suficiente. O presente trabalho consiste na implementação do processo *FSW* na união dissimilar entre os materiais: Alumínio 6060 T5 e Cobre C110, no qual estuda-se o desempenho de um proposto sistema de translação da ferramenta denominado “duplo recuo”, confrontando-o com o sistema convencional para avaliar seus benefícios. O sistema de duplo recuo corresponde às ações de soldagem em que a ferramenta inicia e termina a soldagem realizando um recuo de 2mm na direção oposta. Já para o sistema convencional a ferramenta penetra, translada e sobe. Para possibilitar este estudo, realizou-se uma revisão bibliográfica concisa em que aborda-se os principais elementos na soldagem por fricção, assim como os parâmetros e configurações utilizados na soldagem pelos autores da área. A metodologia empregada caracteriza-se em natureza como aplicada, explicativa quanto aos objetivos e experimental nos os procedimentos. As soldagens foram realizadas em quatro rotações (800, 900, 1000 e 1100 rpm) nos dois sistemas de translação, e os resultados avaliados em função da inspeção visual das amostras, em ensaios de cisalhamento, verificação de macrografias e ensaios de microdureza. Após análise dos resultados, tem-se que a soldagem utilizando-se o parâmetro de rotação 900 rpm sob o sistema convencional de translação, apresentou a maior confiabilidade nos resultados de cisalhamento monotônico. Os recuos não foram eficientes sob o ponto de vista metalúrgico, deixando vazios nas zonas recuadas. Mesmo assim tem-se que todos os parâmetros variados neste trabalho, independentemente de sistema consistem em uma boa janela de soldagem, que permite soldar sustentavelmente os materiais Al/Cu excluindo qualquer terceiro elemento (ex.: pinos, parafusos, etc.) comumente utilizado.

**Palavras-chave:** *Friction Stir Welding*, Junta sobreposta, Fricção, Soldagem.



## ABSTRACT

The welding solid state FSW (Friction Stir Welding) is a process developed primarily for application in aluminum alloys with low weldability. Recently, studies focused on the use of this method when joining together dissimilar materials, demonstrated the versatility of this process to obtain metallurgical bonds between metals with different properties. The phenomena of chemical bonds involved in the FSW method caused by the temperature elevation by mechanical friction and mixing plastic materials, results in the application of FSW in basically all materials that have sufficient ductility. The present work consists in implementing the FSW process in the union between the following dissimilar materials: Aluminum 6060 T5 and C110 Copper, in which we study the performance of a proposed tool translation system called "double recoil", comparing it with the conventional system to evaluate its benefits. The double recoil system correspondent welding actions, where the tool starts and ends welding, conducting a 2mm retreat in the oposite direction. As for the conventional system, the tool penetrates, moves and returns. To enable this study, we made a concise literature review which it approaches the main elements in friction welding, as well as the parameters and settings used in welding by the specialists. The methodology is characterized as applied in nature of the search, explanatory as to the purposes and experimental in the procedures. The welds are performed by applying one of four ratios of rotation (800, 900, 1000 and 1100 rpm) in both translation systems, and the results evaluated on the basis of visual observation of the samples, doing tensile tests, verifying of macrographs and trials of microhardness along the weld beads. After analyzing the results, it was noticed that the welding using the rotation parameter 900 rpm under the conventional system of translation, showed the highest reliability in the results of monotonic traction. The retreats were not effective under the metallurgical point of view, leaving voids in the reworked areas. Even so it follows that all the parameters varied in this work, independently of the system, are consistent of a good welding window, allowing sustainably welding Al / Cu materials excluding any third element ( ex .: pin, screw , etc.) commonly used.

**Keyword:** Friction Stir Welding, Lap joint, Friction, Welding.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de soldagem por atrito.....	29
Figura 2 - Arranjo de átomos.....	30
Figura 3 – Componentes do Processo FSW .....	33
Figura 4 – Zonas da soldagem.....	33
Figura 5 – Zonas da soldagem de junta dissimilar .....	34
Figura 6 – Geometrias dos pinos das ferramentas.....	35
Figura 7 – Ferramentas desenvolvidas pelo <i>TWI</i> .....	36
Figura 8 – Extremos dos parâmetros no aporte de energia .....	39
Figura 9 – Inclinação da ferramenta com relação ao eixo z .....	40
Figura 10 – Defeitos visuais de uma solda <i>FSW</i> .....	41
Figura 11 – Equipamentos dedicados ao processo <i>FSW</i> .....	43
Figura 12 – Avanço em mm/rot utilizados por diferentes autores.....	47
Figura 13 – Tipologia da pesquisa .....	52
Figura 14 – Dimensões dos materiais base (mm) .....	54
Figura 15 – Dispositivo de fixação.....	55
Figura 16 – Centro de usinagem CNC ROMI D 800 .....	56
Figura 17 – Ferramenta desenvolvida – dimensões em mm.....	56
Figura 18 – Posição das chapas – dimensões em mm .....	58
Figura 19 – Sistema de avanço convencional (SR).....	60
Figura 20 – Sistema de avanço convencional (SR): Vista superior – dimensões em mm .....	60
Figura 21 – Sistema de com dois recuos (DR).....	61
Figura 22 – Sistema de avanço com dois recuos (DR): vista superior – dimensões em mm .....	61
Figura 23 – Ilustração do arranjo para o ensaio de cisalhamento .....	63
Figura 24 – Escorregamento entre as chapas de suporte e junta .....	64
Figura 25 – Superfícies para análise macroscópica e microdureza .....	65
Figura 26 – Fluxograma de experimentos.....	67
Figura 27 – Primeiras juntas dissimilares soldadas pelo processo <i>FSW</i> . .....	69
Figura 28 – Modos de ruptura nos ensaios de cisalhamento .....	71
Figura 29 – Ensaios de cisalhamento para 800 rpm .....	71
Figura 30 – Ensaios de cisalhamento para 900 rpm .....	72
Figura 31 – Ensaios de cisalhamento para 1000 rpm .....	73
Figura 32 – Ensaios de cisalhamento para 1100 rpm .....	73
Figura 33 – Resultados gerais dos ensaios de cisalhamento .....	74
Figura 34 – Levantamento das chapas para o sistema SR.....	75
Figura 35 – Levantamento das chapas para o sistema DR.....	76
Figura 36 – Adesão no entorno da penetração da ferramenta.....	76
Figura 37 – Macrografias longitudinais dos corpos de prova DR. ....	78
Figura 38 – Macrografias longitudinais de corpo de prova SR 900 .....	79
Figura 39 – Macrografias transversais. ....	81
Figura 40 – Classificação das medições de microdureza. ....	82

Figura 41 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 800.....	82
Figura 42 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 900.....	83
Figura 43 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 1000.....	84
Figura 44 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 800 .....	85
Figura 45 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 900 .....	86
Figura 46 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 1000 .....	86
Figura 47 – Distribuição de microdureza longitudinal: SR 900 lado recuo.....	87
Figura 48– Distribuição de microdureza longitudinal: SR 900 lado avanço .....	87
Figura 50 – Certificado do Cobre C110 .....	98
Figura 51 – Certificado do Alumínio 6060 T5.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros adotados para soldagem <i>FSW</i> sobreposta Al/Cu por pesquisadores da área.....	46
Tabela 2 – Propriedades do Alumínio .....	48
Tabela 3 – Classificação das ligas de Alumínio .....	49
Tabela 4 – Propriedades do Cobre .....	50
Tabela 5 – Classificação das ligas de Cobre.....	51
Tabela 6 – Composição química do Alumínio 6060 .....	53
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do Alumínio 6060 T5 .....	53
Tabela 8 – Composição química da liga de Cobre C110 .....	53
Tabela 9 – Propriedades mecânicas da liga de Cobre C110 ½ duro .....	54
Tabela 10 – Relação dos parâmetros .....	62
Tabela 11 – Resultados gerais dos ensaios de cisalhamento.....	74

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estados de Têmperas “T” do Alumínio .....	49
Quadro 2 – Cronograma de atividades .....	68
Quadro 3 – Indicativo de vazios nas zonas de recuo. ....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Aluminium Association

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials

CDA – *Copper Development Association*

CNC – Comando numérico computadorizado

Cu – Cobre

FSW – Friction Stir Welding

IMCs – Compostos Intermetálicos

MAG – Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

NBR – Norma Brasileira Registrada

SALM – Soldagem por atrito linear e mistura

SZ – Zona de Mistura

TIG – Tungsten Inert Gas

TWI – The Welding Institute

Vd – Volume dinâmico

Ve – Volume estático

ZTA ou HAZ – Zona Termicamente Afetada

ZTMA ou TMAZ – Zona Termo-mecanicamente Afetada



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivos .....	27
1.2	Justificativa.....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1	Friction Stir Welding .....	29
2.1.1	Nomenclatura .....	32
2.1.2	Zonas da soldagem .....	33
2.1.3	Geometria da Ferramenta .....	35
2.1.4	Parâmetros do Processo de soldagem.....	37
2.1.4.1	Velocidade Angular (Rotação) e Avanço da Ferramenta .....	37
2.1.4.2	Ângulo de inclinação da ferramenta .....	40
2.1.5	Defeitos .....	41
2.1.6	Equipamentos.....	42
2.1.7	Uniões sobrepostas Al/Cu .....	43
2.2	Ligas de Alumínio.....	48
2.2.1	Liga Alumínio AA6060 .....	50
2.3	Ligas de Cobre.....	50
2.3.1	Cobre Eletrolítico .....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
3.1	Materiais e equipamentos .....	53
3.1.1	Metais de Base .....	53
3.1.2	Dispositivo de fixação.....	54
3.1.3	Equipamento.....	55
3.1.4	Ferramenta .....	56
3.2	Delineamento dos experimentos e ensaios.....	57
3.2.1	Posição das chapas.....	57
3.2.2	Rotação e velocidade de avanço.....	59
3.2.3	Translação da ferramenta.....	59
3.2.4	Relação dos parâmetros.....	62
3.2.5	Ensaio.....	63
3.2.5.1	Inspeção Visual .....	63
3.2.5.2	Ensaio de Cisalhamento.....	63

3.2.5.3	Ensaio de Microdureza e Macrografias.....	65
3.2.6	Fluxograma dos experimentos.....	66
3.2.7	Cronograma de experimentos.....	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
4.1	Soldagens <i>FSW</i> .....	69
4.2	Ensaio de Cisalhamento.....	69
4.3	Macrografias e Microdurezas.....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	91
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADO DO COBRE C110 .....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO B – CERTIFICADO DO ALUMÍNIO 6060 T5.....</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Componentes metálicos em Alumínio (Al) e Cobre (Cu) são usados em muitos equipamentos, seja na indústria eletrônica, na indústria química, na transmissão de energia, indústria bélica ou em equipamentos térmicos. Por isso, em algum momento poderá ser necessário fazer o uso de algum tipo de união entre esses dois materiais. Cabe destacar que parafusos e rebites são os meios mais comuns de se implementar esta união. Tais elementos mecânicos aumentam o peso do equipamento e limitam, na maioria dos casos, a resistência da junta, pois diminuem a seção resistente do metal base, além dos furos agirem como concentradores de tensões, agravando os problemas em solicitações dinâmicas, podendo levar o componente à falha.

Kahl e Osikowicz (2013) enfatizam o interesse na junção desses dois materiais para o futuro dos carros elétricos, eis que as baterias de Lithium-ion utilizadas nesses tipos de veículos requerem a ligação em série de um grande número de células individuais e um número de conexões de mesma ordem é necessário para esta aplicação, uma vez que os eletrodos e coletores de correntes das células são baseados em Alumínio e Cobre.

A soldagem entre materiais dissimilares corresponde a processos complexos, no que se refere a união Al/Cu. Nesse sentido, métodos como a soldagem ultrassônica e a soldagem a laser trazem complicações na união devido a fusão dos materiais, que produz compostos intermetálicos frágeis em larga escala (ELREFAEY; TAKAHASHI; IKEUCHI, 2005). As dilatações e contrações provenientes das trocas de fase geram trincas ou tensões residuais que comprometem a solda. O Al e o Cu possuem boas propriedades de condutividade térmica, portanto, utilizando-se altas temperaturas os resultados negativos das zonas termicamente afetadas (ZTA) são muito extensos.

Segundo Thomas et al. (1991), o The Welding Institute (*TWI*) em 1991 apresentou um método inovador que pode ser aplicado em uniões deste tipo, sendo denominado de Friction Stir Welding (*FSW*). Tal método permitiu avanços significativos na área de soldagem, e consiste na mistura mecânica dos materiais em estado sólido, através do calor gerado pelo atrito e movimento da ferramenta. Ao fato dos materiais não necessitarem ultrapassar as temperaturas de fusão para

serem soldados, as complicações geradas pela fusão e solidificação não são evidentes.

De acordo com Mubiayi e Akinlabi (2013), a geração de compostos intermetálicos (IMCs) são nulas ou limitadas no FSW para materiais similares.

Para juntas dissimilares, mesmo executando soldagens mais eficientes e eficazes pelo método FSW, observa-se que IMCs misturados na zona de soldagem podem gerar dificuldades e limitar a resistência mecânica da união se não forem controlados. Isto ocorre devido à alta afinidade entre o Al e o Cu (SAEID; ABDOLAAH-ZADEH; SAZGARI, 2010).

Recentemente Tan et al. (2013) identificaram melhorias na qualidade de uma junta de topo, entre os materiais citados, em que a resistência mecânica se elevou na presença IMCs em nano escala. Kahl e Osikowicz (2013) concluíram estudos sobre melhorias nos resultados do processo *FSW*, realizando posteriores laminações a frio em juntas topo entre Al/Cu. Ou seja, o interesse na pesquisa nesta área vem trazendo novas descobertas.

Os parâmetros de soldagem utilizando o processo *FSW* ainda não são concretos e definidos para as ligas dissimilares Al/Cu. Chamam a atenção os compostos intermetálicos, a assimetria da união, as cavidades e a desuniformidade de dureza ao longo do cordão de solda como problemas encontrados em uniões deste tipo. Isso deixa esta parte da manufatura em aberto para novas soluções e descobertas, principalmente no que se refere a juntas sobrepostas, pois o maior foco está nas uniões de topo lineares, devido à sua maior aplicabilidade.

Barekatain, Kazeminezhad e Kohabi (2013) argumentam que, em vista da gama de parâmetros, os autores que publicaram trabalhos na área de juntas dissimilares trazem resultados de sucesso na soldagem mas que diferem uns dos outros, gerando inconsistência no conhecimento dos fenômenos que permeiam o processo *FSW*.

Galvão et al (2013) atentam para o fato de que as uniões dissimilares sob configuração de união em topo estão sendo muito mais exploradas do que as sob configuração sobreposta, sobre a qual apenas um número muito pequeno de pesquisas estão sendo conduzidas. Estas também apresentam resultados diferentes. Ademais, estão sendo aplicadas quase que unicamente aos metais comercialmente puros e apenas alguns trabalhos focam nas uniões das ligas de Alumínio das séries 6xxx e 5xxx.

Por ser um assunto em aberto na engenharia, muitos estudos e investigações podem ser iniciados no tema da soldagem por fricção. Este trabalho sugere a investigação de uma soldagem executando-se maior mistura mecânica no cordão de solda modificando-se o avanço translacional da ferramenta, baseando-se na hipótese de que a maior mistura acarretará em uma maior resistência do cordão. Uma vez que os extremos da região soldada possuem menor resistência devido aos pontos de entrada e saída da ferramenta na soldagem *FSW*, se implementará a maior mistura nestas regiões através de um retrabalho recuando a ferramenta durante a soldagem. O processo a ser investigado e desenvolvido é denominado neste trabalho como um processo de “dois recuos”<sup>1</sup>.

Desse modo, tem-se para este trabalho a seguinte questão de pesquisa: **a execução deste modelo de soldagem, denominado como “dois recuos”<sup>1</sup>, executado sob determinados parâmetros de soldagem pelo processo *FSW*, gera uma união entre as ligas Al/Cu de forma a promover boas propriedades mecânicas da junta em comparação ao modelo convencional de soldagem executado sem os recuos?**

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho busca implementar uma soldagem em juntas sobrepostas entre os materiais Al 6060 T5 / Cu ASTM-B-187 liga C110 ½ duro, utilizando variadas configurações dos parâmetros de rotação e modo de avanço da ferramenta, com o objetivo de proporcionar à união uma resistência mecânica que seja satisfatória.

Visando atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos são planejados, entre eles:

- compreender os parâmetros de soldagem relevantes do processo;
- determinar a velocidade de rotação ótima da ferramenta em função das outras variáveis adotadas;
- verificar a presença de defeitos;

---

<sup>1</sup>O processo “dois recuos” foi assim definido pelo autor, pois não se encontrou na literatura estudada processo semelhante. Que consiste em um modo diferenciado de translação da ferramenta, em que se executa um pequeno retrocesso no avanço da ferramenta no início do cordão de solda (primeiro recuo) e outro ao final do cordão (segundo recuo).

- investigar mudanças entre as zonas de soldagem recuadas e as zonas trabalhadas normalmente;
- medir a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova;
- comparar os resultados entre os modelos convencional de soldagem e o de dois recuos, proposto neste trabalho.

## 1.2 Justificativa

Justifica-se o estudo pelo estágio atual em que se encontra o conhecimento a respeito do tema, pois ele deixa em evidência algumas dúvidas com relação aos parâmetros de soldagem. O estudo fundamental em um processo de translação diferenciado, no caso o chamado “dois recuos” serve para reforçar o conhecimento acadêmico na área, uma vez que não foram encontradas, na literatura estudada, implementações deste procedimento na soldagem *FSW*.

Para a área de soldagem, o presente trabalho poderá ser o ponto de partida para estudos mais aprofundados, que em função dos possíveis benefícios do “duplo recuo”, possibilitará tornar o *FSW* mais concretizado como alternativa à soldagem de juntas dissimilares do tipo Alumínio e Cobre.

Não menos importante, o aprendizado obtido no estudo de tecnologias inovadoras, tais como o *FSW*, serve para possibilitar uma graduação de excelência, objetivo maior do Trabalho de Conclusão de Curso.

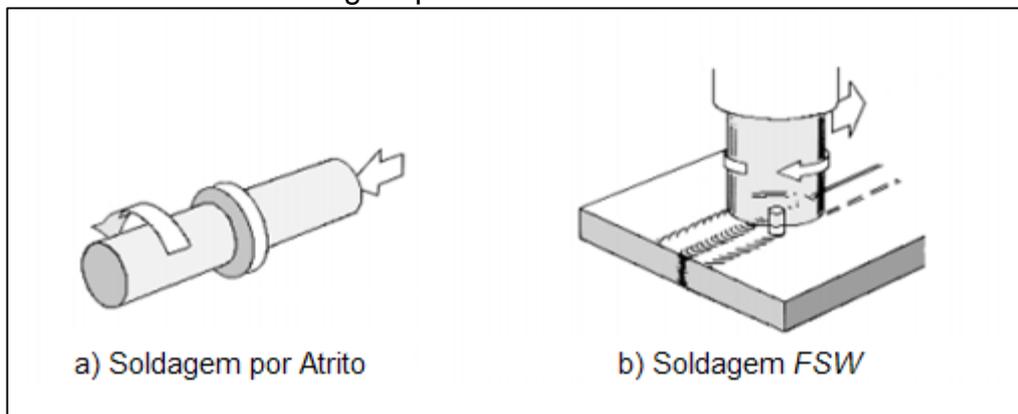
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Friction Stir Welding

Patenteada em 1991 pelo *The Welding Institute (TWI)*, na Inglaterra, a soldagem FSW consistiu em um avanço tecnológico para a área (THOMAS et al., 1991). Adaptado do primeiro processo de soldagem por fricção, que se desenvolveu nas décadas de 50 e 60, o método *FSW* possibilitou a soldagem de tipos de juntas diferentes das convencionais, necessárias para se utilizar o processo de soldagem por fricção, que consistia em unir eixos concêntricos.

Para ilustrar a evolução do processo de soldagem por fricção, apresenta-se na Figura 1, em “a”, a soldagem por atrito desenvolvida nos anos 50 e 60, e, em “b”, o método *FSW*, que em português foi denominado como “Soldagem por atrito linear com mistura (SALM)” (PAIVA, 2009). Cabe mencionar que, como esta denominação não foi inteiramente adotada pela comunidade acadêmica, neste trabalho optou-se por adotar *FSW*, pois este termo é utilizado mundialmente.

Figura 1 – Processos de soldagem por atrito



Fonte: Adaptado de Paiva (2009)

Na Figura 1 é possível verificar o funcionamento das soldagens por atrito. Na soldagem convencional, em “a”, forças normais e a rotação são responsáveis pela soldagem. Já na soldagem *FSW*, em “b”, essas forças não são tão evidentes, como nos fenômenos da mistura e atrito.

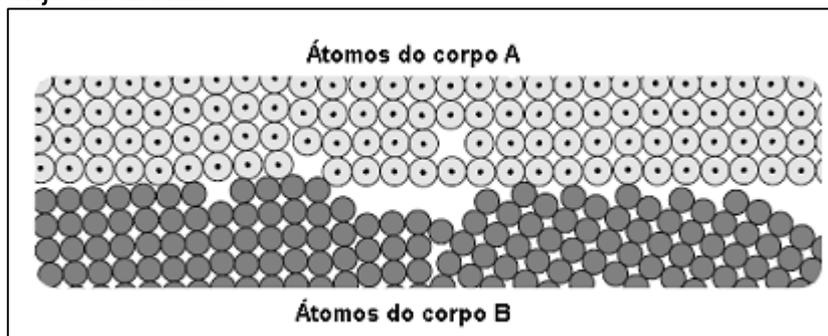
O processo *FSW* promove a soldagem no estado sólido dos materiais, ocorrendo a união, simplesmente com a mistura mecânica realizada por uma ferramenta em alta rotação não consumível, que gera calor, atritando sob forças

normais e velocidades definidas. E, para que ocorra a mistura, basta o material possuir plasticidade suficiente. Segundo Abdolaah-Zadeh, Saeid e Sazgari (2008), o mecanismo de formação da solda no processo *FSW* é melhor assimilado como uma combinação dos mecanismos de forjamento e extrusão.

De acordo com Souza (2010), os materiais podem sofrer adesão quando colocados em contato um com o outro, isto ocorre se as asperezas da superfície forem suficientemente deformadas no contato real, para formação de novas ligações químicas. Esta adesão não ocorre em geral, pois existe a presença de contaminantes como óleo, poeira, óxidos na superfície e irregularidades cristalinas.

A Figura 2 representa um arranjo de átomos em duas dimensões, onde os átomos são as esferas organizadas sob determinada ordem.

Figura 2 - Arranjo de átomos



Fonte: Souza (2010, p. 8)

O contato entre as superfícies não é perfeito devido às inclinações dos planos, diferentes rugosidades superficiais e aos contaminantes. Para que ocorra a soldagem pelo processo *FSW*, a deformação mecânica sob pressão e temperatura deve ser tal para que promova um contato entre as asperezas a distâncias menores que 1nm, para possibilitar a união entre as superfícies dos materiais a serem soldados. (OOSTERKAMP et al., 2004 apud SOUZA, 2010).

Outro aspecto importante a ser salientado é que já são encontradas algumas aplicações do *FSW* em compósitos termoplásticos reforçados com fibras (AHMADI; MOSTAFA ARAB; GHASEMI, 2014) e Aço/Alumínio (KIMAPONG; WATANABE, 2005b), entretanto a maioria dos estudos é voltada para a aplicação na soldagem de ligas de Alumínio.

Um dos motivos para os estudos estarem mais focados em aplicações do Alumínio está ligado às indústrias aeronáutica e automobilística, que buscam mais

eficiência energética e menor geração de poluentes, através da redução de peso utilizando as ligas de Alumínio, devido às cobranças da sociedade e às leis ambientais mais severas.

Estima-se que 10% de redução de peso em um automóvel equivale a cerca de 5,5% de economia em combustível. Desta forma substituir o aço por ligas leves é uma tendência amplamente difundida, uma vez que a redução de peso de um automóvel está atrelada à sua redução no consumo (COLE et al., 1997, apud MILLER, 2000).

Contemporaneamente, a empresa *Eclipse Aviation* incorporou o uso do *FSW* na fabricação da aeronave *Eclipse 500*, eliminando cerca de 70% dos rebites usados, soldando juntas sobrepostas de ligas de Alumínio 2024, 7075 e dissimilares 2024 em 7075. Acrescenta-se ainda a redução no tempo de produção das aeronaves, beneficiando a empresa e os clientes (LOHWASSER; CHEN, 2010).

A deformação termomecânica gerada pela soldagem por fricção pode facilmente ser aplicada ao Alumínio e suas ligas, como já foi dito, devido à plasticidade do material. Desta forma, as ligas de Cobre, Zinco e Magnésio também podem ser soldadas pelo processo *FSW* (SORENSEN; NELSON, 2007). Complementando a assertiva anterior, vale citar que seu estudo não está em tanta evidência.

Segundo Capelari (2006), o processo *FSW* apresenta vantagens quando comparado à soldagem por processos convencionais. Por exemplo, comparado ao arco elétrico destacam-se: excelentes propriedades mecânicas da junta; ausência de respingos, porosidades e fumos; não necessita de consumíveis ou gases de proteção, bem como requer menor consumo energético.

Fioravanti (2008) da mesma forma coloca uma série de vantagens do processo *FSW* em relação aos métodos convencionais como TIG, MIG/MAG e laser. No processo por atrito e mistura ocorrem baixos índices de empenamento e distorção, devido ao baixo aporte térmico, o que permite unir qualquer tipo de liga de Alumínio, inclusive as dissimilares em composições e espessuras. Por fim, menciona-se que uma das mais importantes vantagens do processo *FSW* requer apenas 2,5% da energia necessária para soldar a laser (MISHRA; MA, 2005, apud FIARAVANTI, 2008).

Outro ponto positivo da soldagem *FSW* é a sua relativa tolerância à limpeza das peças, se as juntas não sofrerem posteriores tratamentos térmicos esta variável

não possui interferência significativa nos resultados da soldagem (THREADGILL; NUNN, 2003 apud HILLER, 2007).

Como todo o processo de soldagem, o *FSW* também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo: necessidade de sistemas de fixação suficientemente rígidos para cada tipo de junta a unir; equipamento para a soldagem igualmente rígido e robusto, de baixa flexibilidade, difícil portabilidade e de custo elevado; baixa versatilidade das ferramentas, cada tipo de junta necessita sua ferramenta com geometria específica; elevado tempo de *setup*; parâmetros difíceis de serem determinados e furo deixado ao final da soldagem (SOUZA, 2010).

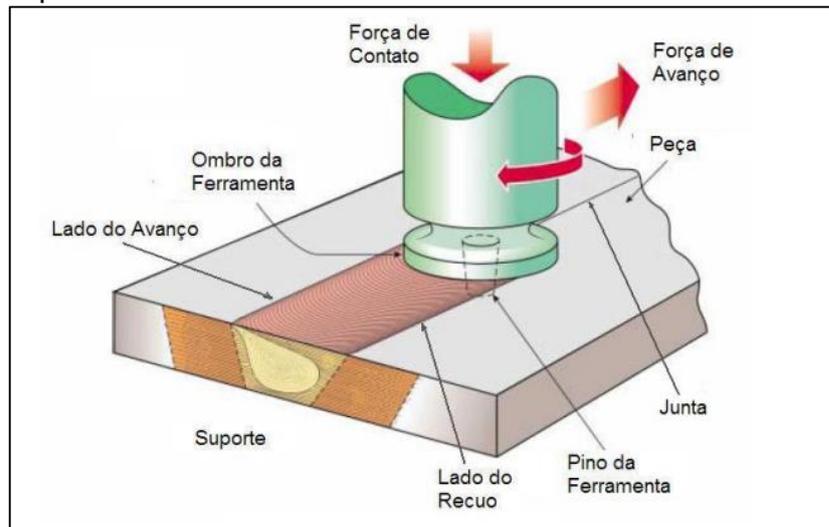
### 2.1.1 Nomenclatura

Denomina-se “pino”, a porção da ferramenta que penetra no material a ser soldado. É o elemento responsável pela mistura e parte da geração de calor por atrito. Chama-se “ombro” a região da ferramenta que delimita o fluxo de metal na soldagem, que também fricciona e gera calor para promover a solda. O “Lado de Avanço” corresponde ao lado da ferramenta em que o sentido da velocidade tangencial da mesma coincide com o sentido de translação ou sentido de avanço da ferramenta, já no “Lado de Recuo” os sentidos tangenciais e de translação são contrários.

A diferença de velocidade entre os lados de avanço e recuo gera certa assimetria no processo, pois o fluxo de metal não é igual em ambos os lados, segundo Hiller (2007) este fenômeno é inerente ao método *FSW*. Algumas pesquisas tentaram buscar melhorar este problema de assimetria estudando novas maneiras de transladar a ferramenta, inclusive modificando o pino para exercer movimentos orbitais.

Para permitir visualizar os componentes juntamente com suas respectivas denominações, apresenta-se a Figura 3.

Figura 3 – Componentes do Processo FSW



Fonte: Hiller (2007, p.1)

A junta ilustrada na Figura 3 é de “topo”, onde as faces das partes a serem soldadas são colocadas uma ao lado da outra. Convém salientar que o estudo deste trabalho é sob uma união “sobreposta”, mas as denominações da ferramenta e das regiões do processo são as mesmas.

### 2.1.2 Zonas da soldagem

Como o processo envolve a geração de calor e forte mistura mecânica dos materiais, após a soldagem o material base e a região soldada logicamente não terão mais as mesmas características anteriores ao processo no que diz respeito a tamanho de grão e outros aspectos. As zonas típicas formadas no processo FSW são: *Stir Zone (SZ)*, ou Zona de Mistura; *Thermomechanically-affected Zone (TMAZ)* ou em português, Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA); *Heat Affected Zone (HAZ)* ou Zona termicamente afetada (ZTA). Estas zonas são representadas na Figura 4.

Figura 4 – Zonas da soldagem



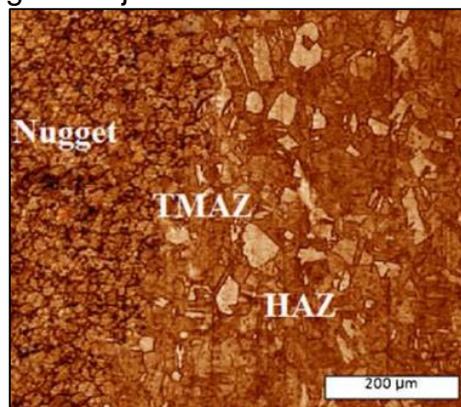
Fonte: Adaptado de Santos (2010)

Para cada zona de soldagem apresentada na Figura 4, Santos et al. (2010) descrevem o seguinte:

- *Stir Zone (SZ)* – também denominada *nugget*, apresenta grãos equiaxiais e refinados resultantes da recristalização dinâmica. Os microscópios típicos de baixa resolução geralmente não são suficientes para investigar estes pequenos grãos que variam de microns a menores escalas. A largura desta zona é levemente maior que o diâmetro do pino e um pouco menor que a dimensão do ombro, ou seja, as características geométricas da SZ são intrinsicamente ligadas com a ferramenta utilizada.
- Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA) – é afetada por uma leve deformação e por temperaturas elevadas. Sob uma ótima microscopia é possível observar recristalizações. O aumento de temperatura também interfere na dureza desta região, podendo inclusive gerar precipitados.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA) – é a zona afetada unicamente pela temperatura, com uma microestrutura similar ao metal base, dependendo do aporte de energia e da condição de tratamento térmico do material. Por exemplo, para alumínios da série 6xxx a redução de dureza nesta zona pode chegar a 50%.
- Material Base (BM) – material base das chapas soldadas, suas propriedades não são alteradas após a execução da solda.

A Figura 5 mostra uma imagem de um ensaio metalográfico da região de uma soldagem através do método *FSW* de uma junta dissimilar sobreposta.

Figura 5 – Zonas da soldagem de junta dissimilar



Fonte: Akbari, Behnagh e Davvand (2012, p. 584)

É possível identificar claramente três regiões distintas na Figura 5, *Nugget* (SZ) com finos grãos acompanhados da completa recristalização do material, circundado pela ZTMA (*TMAZ*) com microestrutura significativamente diferente. Mesmo apresentando deformação plástica, a ZTMA não sofreu recristalização. Observa-se ainda a ZTA (*HAZ*) sendo influenciada somente pela temperatura, com grão de tamanho relativamente maior que do material base (AKBARI; BEHNAGH; DADVAND, 2012).

### 2.1.3 Geometria da Ferramenta

São muitos os estudos acerca da geometria mais adequada para realizar a soldagem por fricção. Existem, atualmente, ferramentas com pino liso, roscado, geometrias em forma de espirais, desalinhadas do centro, quadradas, triangulares, entre outras. Também podem ser feitas de materiais diversos como aços ferramenta, aços carbono endurecidos, com revestimentos de metais duros.

O aprimoramento da ferramenta em função da assimetria da união tem sido muito estudado, devido à diferença causada na temperatura e no fluxo de material entre os lados de avanço e recuo.

Na Figura 6 são ilustrados três tipos de ferramentas utilizadas para o processo *FSW*.

Figura 6 – Geometrias dos pinos das ferramentas

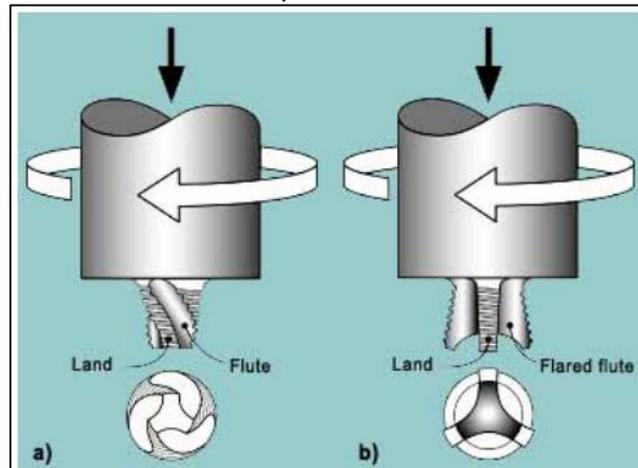


Fonte: Capelari (2006, p.28)

Na Figura 6, da esquerda para a direita, pode-se identificar o tipo pino cônico liso, o pino cônico com rosca e o pino facetado liso, que foram utilizados em estudos na soldagem de ligas de Alumínio.

Dentre as geometrias de ferramentas mais complexas desenvolvidas, destacam-se os protótipos desenvolvidos pelo *TWI* apresentados na Figura 7. A ferramenta *MX Triflute TM* em “a)” e a ferramenta *Flared-Triflute TM* em “b)”.

Figura 7 – Ferramentas desenvolvidas pelo *TWI*



Fonte: Thomas e Dolby (2002, não paginado)

Os protótipos de ferramentas apresentados na Figura 7 demonstram geometrias complicadas para serem manufaturadas. Os valores agregados em componentes destes só remetem à importância de se ter os parâmetros do processo completamente desenvolvidos, visto que a quebra de uma ferramenta em função de algum parâmetro desajustado (avanço excessivo, por exemplo) pode somar excessivamente nos custos de produção de algum componente.

O projeto da ferramenta influi basicamente no fluxo de material, este por sua vez é complexo e pode-se dizer que a maior parte da deformação é causada por cisalhamento do material em torno da ferramenta. O pino da ferramenta possui o chamado volume dinâmico ( $V_d$ ) e o volume estático ( $V_e$ ), O volume estático é o volume físico, real do pino, já o dinâmico corresponde ao volume equivalente, ou aparente do pino quando ele está em rotação (CAPELARI, 2006).

As dimensões determinadas para a criação da ferramenta para soldagem no processo *FSW* possuem relação com a espessura da chapa a unir. Para uniões de topo uma proporção genérica do comprimento do pino deve ser da ordem de décimos de milímetros menor que a espessura da chapa, e o diâmetro do pino cilíndrico aproximadamente da mesma espessura da chapa (SOUZA, 2010).

De acordo com Souza (2010), o diâmetro do ombro da ferramenta também é relacionado com as chapas a serem soldadas, sendo esse de aproximadamente três

vezes o diâmetro do pino. A compressão gerada pelo ombro é responsável pela contenção do material plastificado na zona de solda e pela geração de calor na superfície através da fricção. Desta forma, é lógico pensar que para juntas de espessuras maiores, maiores temperaturas são necessárias. Por sua vez, a dimensão do ombro é diretamente proporcional à espessura da chapa, sendo o ombro o principal elemento a gerar calor para a soldagem.

A efetividade da junta é estritamente dependente dos parâmetros utilizados, incluindo as relações geométricas da ferramenta, como a altura e o formato do pino e do ombro, pois eles têm forte influência no fluxo de metal e na geração de calor e nas forças envolvidas. Verifica-se, assim, que a integridade da solda depende do projeto da ferramenta (BUFFA et al., 2006).

#### **2.1.4 Parâmetros do Processo de soldagem**

Os benefícios do processo de soldagem por fricção só são evidentes e constatados se os parâmetros do processo estiverem corretamente ajustados.

As variáveis influem, por exemplo, na fluidez do material, na formação de defeitos, nas forças envolvidas, no tamanho de grão e na temperatura (LOHWASSER; CHEN, 2010).

As principais variáveis controláveis do processo são:

- *Velocidade angular da ferramenta;*
- *Velocidade de avanço da ferramenta;*
- *Geometria da ferramenta;*
- *Profundidade de penetração do pino;*
- *Ângulo da ferramenta.*

##### **2.1.4.1 Velocidade Angular (Rotação) e Avanço da Ferramenta**

A rotação da ferramenta é intrinsecamente ligada à geração de energia e mistura na soldagem, sendo bem aceito o fato de que a temperatura envolvida no processo é diretamente proporcional ao aumento da rotação da ferramenta e inversamente à velocidade de avanço. Ou seja, a temperatura no momento da união

aumentará com a redução da velocidade de avanço ou com o aumento da rotação. Além do mais, a execução de uma soldagem com os dois parâmetros elevados acarretam uma alta taxa de resfriamento (ZETTLER, 2010). Isto pode refletir em benefícios mecânicos ou problemas microestruturais, dependendo dos materiais envolvidos.

Para proporcionar uma maior vida da ferramenta ou, até mesmo a viabilidade da soldagem, é necessário minimizar os esforços atuantes no sistema. Se o material não se aquecer o suficiente, as forças tendem a serem maiores, podendo vir a quebrar a ferramenta e dar origem a vazios na microestrutura da região da solda. Por outro lado, temperaturas muito elevadas podem resultar em defeitos e trincas (CERVEIRA, 2008).

Sabe-se que a temperatura durante a soldagem tem forte influência no tamanho de grão resultante do material soldado, uma vez que a rotação está relacionada com a geração de calor, altas rotações podem comprometer a união devido ao crescimento exacerbado dos grãos (CAVALIERE; SQUILLACE, 2005 apud CERVEIRA, 2008). Entretanto, há exemplos na soldagem pelo método FSW, de existir um limite superior para o qual o aumento da rotação não mais elevará a temperatura, pois, a partir de certo ponto, o aquecimento do material modifica o coeficiente de atrito durante o processo (CAPELARI, 2006).

O aumento da rotação, ao contrário do que se imagina, causa a diminuição da zona de mistura e deformação. Este fato pode ser atribuído ao aumento significativo da temperatura de processamento do material em contato com as imediações da ferramenta, que diminui significativamente os esforços (COLEGROVE; SHERCLIFF; ZETTLER, 2007).

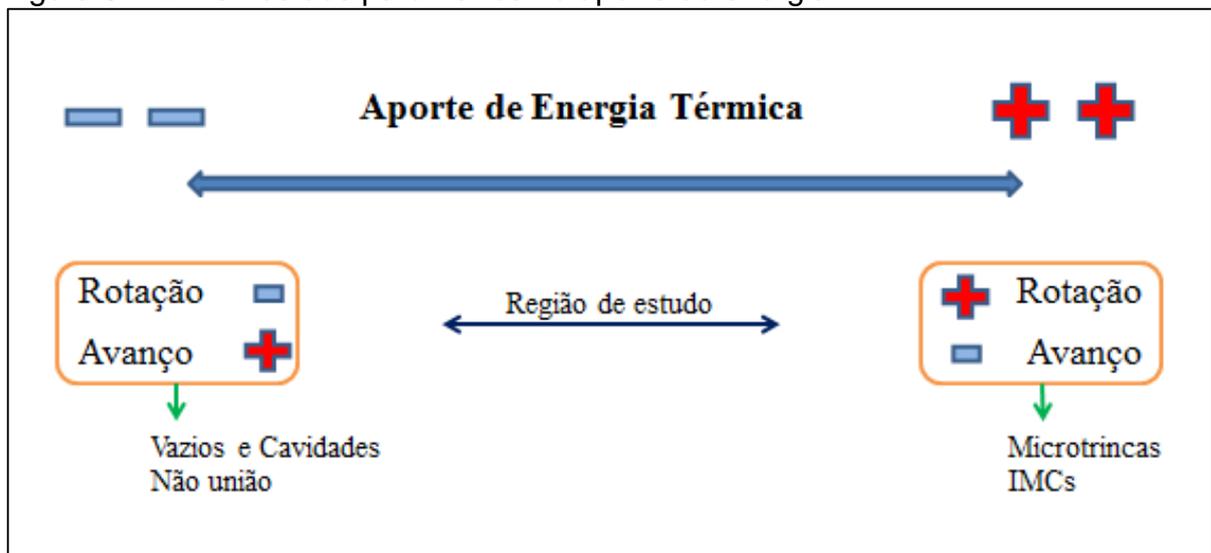
Para Saeid, Abdollah-zadeh e Sazgari (2010), os estudos apontam que existe uma região ótima para a velocidade de avanço, entre os extremos. Neste sentido, os autores descrevem que, para velocidades muito baixas, microtrincas são os problemas; já para velocidades altas as cavidades ou vazios são os problemas. Estas microtrincas situam-se nos contornos dos compostos intermetálicos, os quais são formados através do transporte vertical de material na junta sobreposta, que é mais acentuado utilizando-se baixas velocidades de avanço.

Um recente estudo em função dos compostos intermetálicos duros gerados na soldagem *FSW* demonstrou que estes podem contribuir positivamente para a união, contrariando o senso comum criado pelos pesquisadores da área, de que a

presença de *IMCs* sempre resulta no enfraquecimento da junta, devido à fragilidade e microtrincas, ou seja, concentradores de tensões em geral. Porém, descobriu-se que estes mesmos compostos, se distribuídos uniformemente na matriz e, principalmente, em nano escala, representam um aumento da ordem de 70% na eficácia da união. Este controle do processo é dado principalmente ao aporte de energia e à interação com os parâmetros de rotação e velocidade de avanço (TAN et al., 2013).

Independentemente da configuração de união adotada, da ferramenta utilizada, dos materiais usados, das juntas serem similares ou dissimilares, a energia envolvida no processo pode ser entendida explicitando-se os dois extremos opostos de aporte térmico, como na Figura 8, onde tem-se um baixo aporte de energia à esquerda, através de uma baixa rotação e alto avanço; e à direita, rotação elevada e avanço baixo. A região de estudo se encontra entre estes extremos.

Figura 8 – Extremos dos parâmetros no aporte de energia



Fonte: Elaborado pelo autor

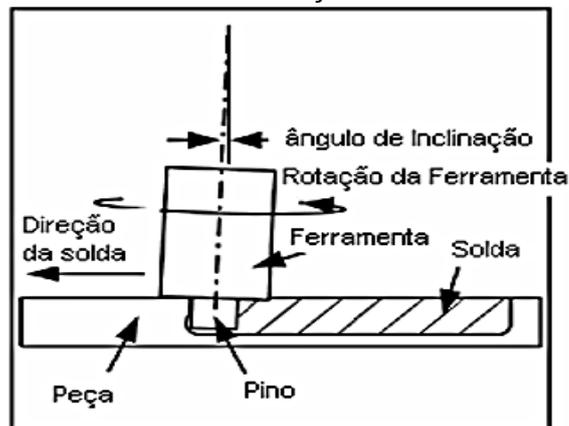
A “região de estudo” indicada na Figura 8 é necessária para qualificar a união de qualquer que seja o material a ser soldado. Experimentalmente a amplitude entre extremos dos parâmetros é diminuída até que se chegue em uma configuração ideal entre rotação e avanço para o sistema de soldagem implementado.

### 2.1.4.2 Ângulo de inclinação da ferramenta

Variável importante a ser considerada no estudo dos parâmetros de soldagem, o ângulo de inclinação por padrão é referenciado em função do eixo normal às chapas, este chamado de z. Esta inclinação é no sentido de avanço da ferramenta. A Figura 9 ilustra uma soldagem utilizando-se o ângulo de inclinação.

A implementação do ângulo de inclinação pode ser limitada ao equipamento utilizado para fazer a soldagem. Dependendo do número de eixos da máquina o ângulo não pode ser utilizado, um exemplo deste caso ocorre quando se adapta uma fresadora convencional de três eixos para realizar a soldagem *FSW*.

Figura 9 – Inclinação da ferramenta com relação ao eixo z



Fonte: Cerveira (2008, p. 34)

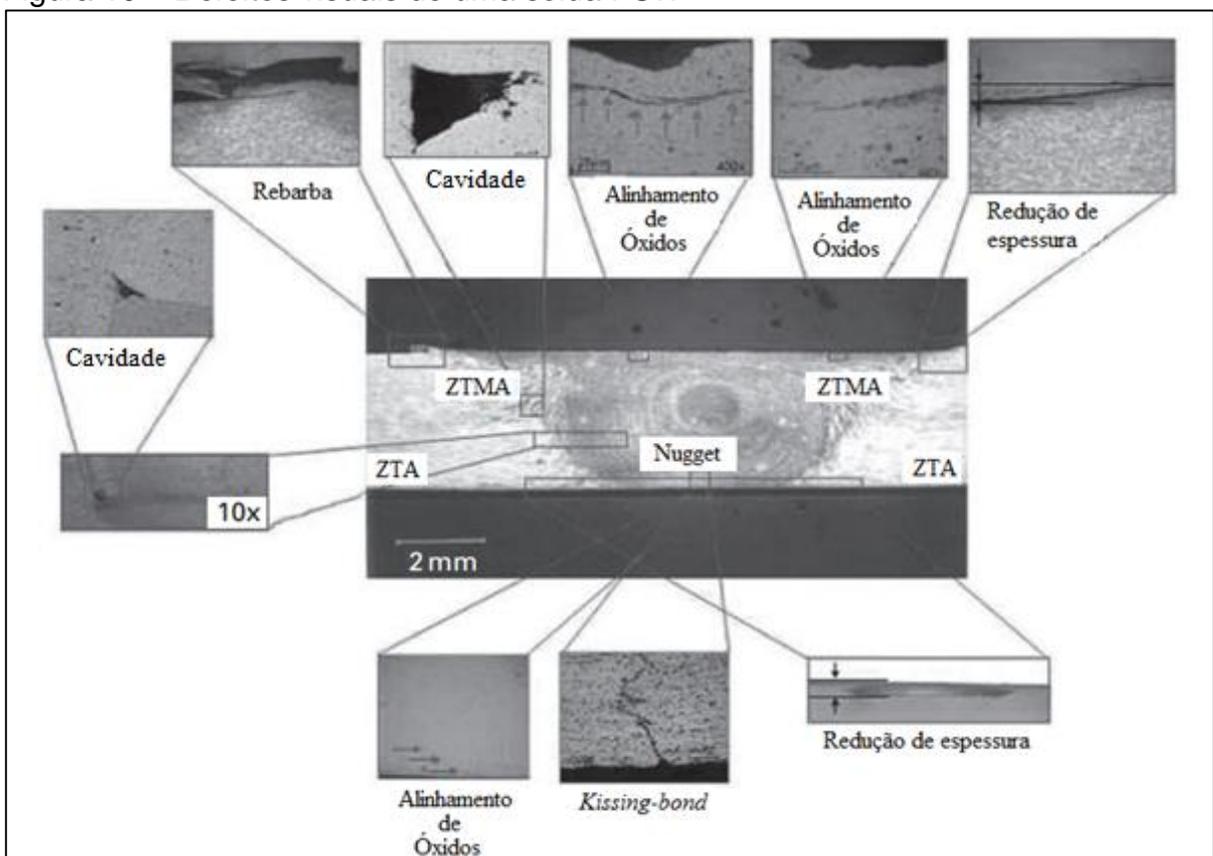
Este ângulo, apresentado na Figura 9, pode variar de 0 a 5°. Para Tolephih et al (2013) a implementação do ângulo ocasiona uma compressão adicional do ombro da ferramenta na região traseira aumentando o esforço de forjamento e reduzindo os vazios e cavidades provenientes da soldagem. Além disso, Hiller (2007) explica que colocar um ângulo de inclinação facilita o progresso da ferramenta, diminuindo os esforços no sentido de avanço da mesma. Ademais a implementação do ângulo de inclinação implica numa maior penetração do pino.

Por exemplo, Kimapong e Watanabe (2005a) realizaram estudos sobre o efeito do ângulo de inclinação nos resultados da soldagem *FSW* em uma junta sobreposta, indicando que a ausência do ângulo (0°) gera imperfeições e o ângulo de 1° se apresentou como melhor solução. Mas, como já foi explicado, os parâmetros de soldagem não são universais. Há consenso quanto aos benefícios de se utilizar um ângulo de inclinação, o qual pode variar entre os extremos 0° e 5°.

### 2.1.5 Defeitos

Os primeiros defeitos e mais simples de serem averiguados, são os evidenciados através de uma inspeção visual como os mostrados na Figura 10, onde são observadas algumas discontinuidades após realizar um corte transversal na região soldada. Os defeitos de superfície são os únicos que são possíveis de se averiguar visualmente sem destruir o corpo de prova.

Figura 10 – Defeitos visuais de uma solda FSW



Fonte: Adaptado de Zappia (2010, p.197)

A Figura 10 apresenta inúmeros defeitos, tais como rebarbas, cavidades, redução de espessura, entre outros, que podem ser observados visualmente. Estes são encontrados quando são usados parâmetros não otimizados ou ferramenta com projeto inadequado.

Thomas e Dolby (2002) explicam que durante a soldagem existe um diferencial de pressão devido à rotação da ferramenta, inerente ao processo, que força o pino a desviar para o lado de avanço. Desta forma, Hiller (2007) argumenta

que os problemas de cavidades surgem com maior predominância no lado avançado do processo, próximos à ZTMA.

As cavidades podem ocorrer quando a pressão imposta na solda é inadequada ou pela combinação de altas velocidades de deslocamento com baixas rotações. A ocorrência destes defeitos está associada ao aporte de calor insuficiente na junta, pois, sendo o material menos aquecido, ele é forjado pelo ombro com maior dificuldade, o que resulta em vazios (HILLER, 2007).

O deslocamento de material na superfície das chapas para o lado da ferramenta produz a chamada rebarba. Ela não é indesejável em todos os casos, sendo usada inclusive como um indicador visual de que a profundidade da ferramenta foi adequadamente atingida em dada aplicação. Neste sentido, para profundidades excessivas, rebarbas da mesma grandeza são produzidas. A geração da rebarba pode indicar também a seleção de parâmetros ou ferramenta inadequadas (GIBSON, 2014).

*Kissing-bonds*, ilustrados na Figura 10, são descontinuidades microscópicas, definidas como superfícies muito juntas, mas insuficientemente para que as asperezas das superfícies iniciais sejam deformadas pela ferramenta e formem novas ligações químicas. Uma das causas deste defeito é a falta de rigidez do dispositivo de fixação (OOSTERKAMP et al., 2004 apud SOUZA, 2010).

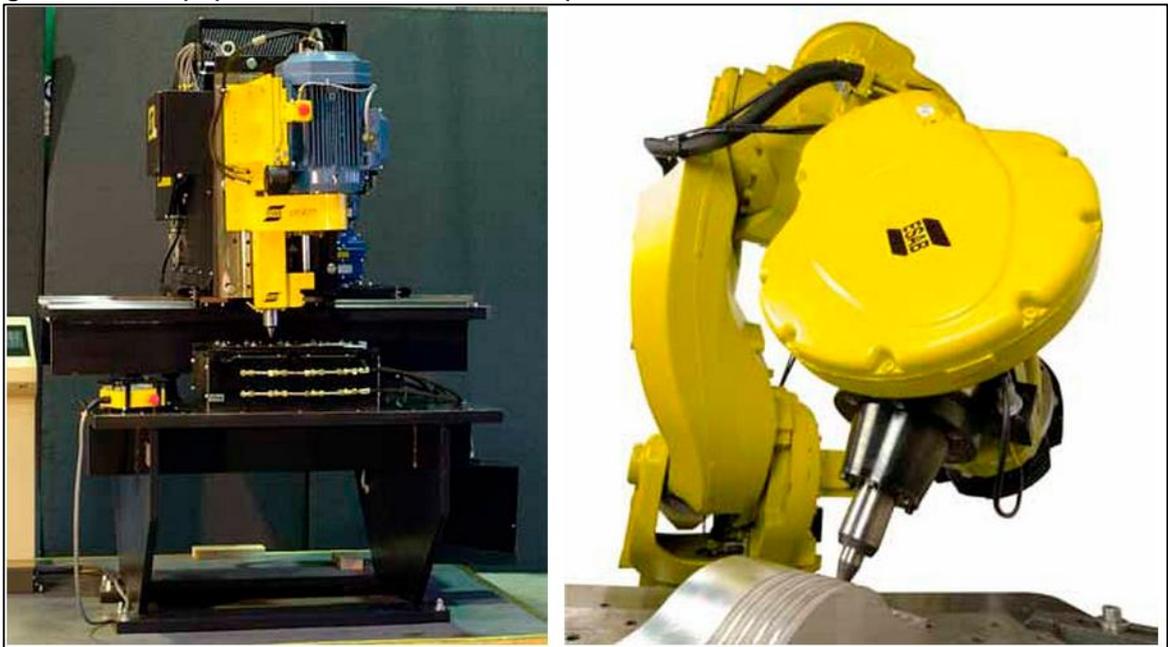
### **2.1.6 Equipamentos**

Para realizar soldagem pelo processo FSW existem máquinas dedicadas para esse processo, desenvolvidas exclusivamente para realizar as funções necessárias do método. Aplicam-se também máquinas fresadoras modificadas e máquinas fresadoras ou centros de usinagem sem alterações.

É mais comum a utilização de fresadoras convencionais ou CNC, assim como centros de usinagem, em função da disponibilidade. Como o *FSW* utiliza uma ferramenta em rotação semelhante à fresa, fresadoras CNC podem ser imediatamente usadas para este processo, com o empecilho da limitação dos esforços suportados por estas máquinas. Portanto, o método é limitado a fresadoras grandes ou a soldagens que não envolvam esforços suficientes para comprometer o equipamento (GIBSON, 2014).

Em função das limitações das máquinas fresadoras convencionais, surgiram as máquinas dedicadas, mais robustas, para uso específico no processo *FSW*, que contam com sensores de monitoramento de esforços, temperatura e posicionamento, permitindo assim maior controle dos parâmetros (GIBSON, 2014). Dois equipamentos dedicados, comerciais e patenteados, são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Equipamentos dedicados ao processo *FSW*



Fonte: Adaptado de ESAB (2014)

### 2.1.7 Uniões sobrepostas Al/Cu

Após levantar alguns fenômenos e parâmetros generalizados a qualquer tipo de material envolvido, é necessário ter ciência do estado em que se encontra a soldagem das ligas dissimilares Al/Cu na configuração sobreposta.

É notável a diferença de número de estudos entre as uniões dissimilares em topo e sobrepostas, sendo muito menores as pesquisas nas uniões sobrepostas.

Um das primeiras publicações encontradas sobre a aplicação da soldagem *FSW* em juntas sobrepostas entre AA1100 H24 e Cobre comercialmente puro, foi desenvolvida pelos pesquisadores Elrefaey et al. (2005), que realizaram investigações da resistência da junta em função de variados parâmetros. Nela, encontrou-se forte dependência da resistência à fratura em relação à profundidade

de penetração do pino, sendo que valores extremamente baixos de resistência foram encontrados quando o pino não penetrou completamente na chapa inferior, neste caso, no Cobre. Os maiores valores de resistência corresponderam à penetração de 0,2 mm na chapa inferior.

Posteriormente, Abdollah-Zadeh, Saeid e Sazgari (2008) realizaram a soldagem entre chapas de Alumínio 1060 e Cobre comercialmente puro, de 4 e 3mm de espessura, respectivamente, apontando a existência de dois fatores que determinam as características de resistência da união: a geração de intermetálicos duros em altos aportes térmicos e o oposto denominado de condição “*cold weld*”, onde baixas gerações de energia térmica resultam em vazios na união.

A maior diferença na soldagem entre os pesquisadores citados está nas relações da geometria da ferramenta: enquanto para Elrefaey et al. (2005) o comprimento do pino possuía apenas 2mm de comprimento em chapas de 2 e 1mm, para Abdollah-Zadeh, Saeid e Sazgari (2008) a ferramenta utilizada possuía 6,5 mm de comprimento, para espessuras de chapas de 4 e 3mm, evidenciando uma maior penetração do pino na chapa inferior, sendo maior ainda devido a inclinação de 3° na ferramenta.

Os mesmos pesquisadores, Saeid, Abdollah-zadeh e Sazgari (2010), refinaram suas pesquisas e ratificaram os extremos dos parâmetros que produzem efeitos indesejados na produção da união soldada. Também afirmaram que a melhor posição da soldagem sobreposta é com o material mais macio na parte superior, neste caso, o Alumínio.

Xue et al. (2011) relataram sobre os benefícios de se utilizar uma ferramenta com um pino de maior diâmetro, no caso, um pino de 8 mm de diâmetro para chapas de 3 mm de espessura dos materiais AA1060 e Cobre comercialmente puro. Segundo os autores, o maior diâmetro permite utilizar rotações menores, coibindo a propagação dos IMCs.

Firouzdor e Kou (2012), implementaram uma soldagem nos materiais Al 6061 e Cobre comercialmente puro, utilizando uma configuração de união até então não vista, chamada por eles de “*modified*” (modificada). Os autores constataram um aumento de resistência desta junta que foi o dobro em comparação a convencional elaborada por todos os outros autores. No entanto, percebe-se que nesta nova implementação da união, a mesma não é puramente sobreposta.

Mais recentemente, Akbari, Behnagh e Dadvand (2012) confrontaram dois casos de configuração da junta sobreposta: o primeiro com Al 7070 acima (em contato com o ombro) e Cu comercialmente puro abaixo; e o segundo caso com essa configuração invertida. Os pesquisadores concluíram que, para os mesmos parâmetros de soldagem, o primeiro caso proporciona um maior aporte de energia devido à menor condutividade térmica do Alumínio em comparação ao Cobre. Para o experimento desenvolvido, isso implicou na melhor resistência da união, pois no segundo caso esta geração de calor foi insuficiente para promover a união entre os dois materiais. Em suma, o Alumínio na parte superior da junta favorece a geração de calor e promove maiores taxas de resfriamento.

Bisadi et al. (2013) implementaram uma soldagem entre os materiais Al 5083 e Cobre comercialmente puro, utilizando algumas configurações de rotação e avanço. Concluíram sobre os problemas dos extremos dos parâmetros, concordando com trabalhos prévios que envolviam alumínios menos ligados.

O mais recente trabalho encontrado, publicado por Galvão et al. (2013), mostra uma série de dúvidas que englobam as uniões dissimilares sobrepostas, dentre elas, a discordância de parâmetros que os autores prévios realizam com sucesso na soldagem entre as ligas de Al e Cu. Estes autores confrontaram os resultados de uniões entre dois tipos de ligas de Alumínio, AA 6082-T6 e 5083-H111 com Cobre-DHP (R240). Galvão et al. (2013) concluíram que a liga envolvida tem forte influência nos resultados da união, e as experimentadas diferiram nas propriedades finais, explicitando a necessidade de estudar os parâmetros para cada tipo específico de liga.

Os estudos apresentados em ordem de publicação são importantes para compreender os resultados das soldagens de trabalhos semelhantes ao que é desenvolvido neste estudo. Os parâmetros utilizados, os materiais soldados e os pesquisadores envolvidos estão compilados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros adotados para soldagem FSW sobreposta Al/Cu por pesquisadores da área

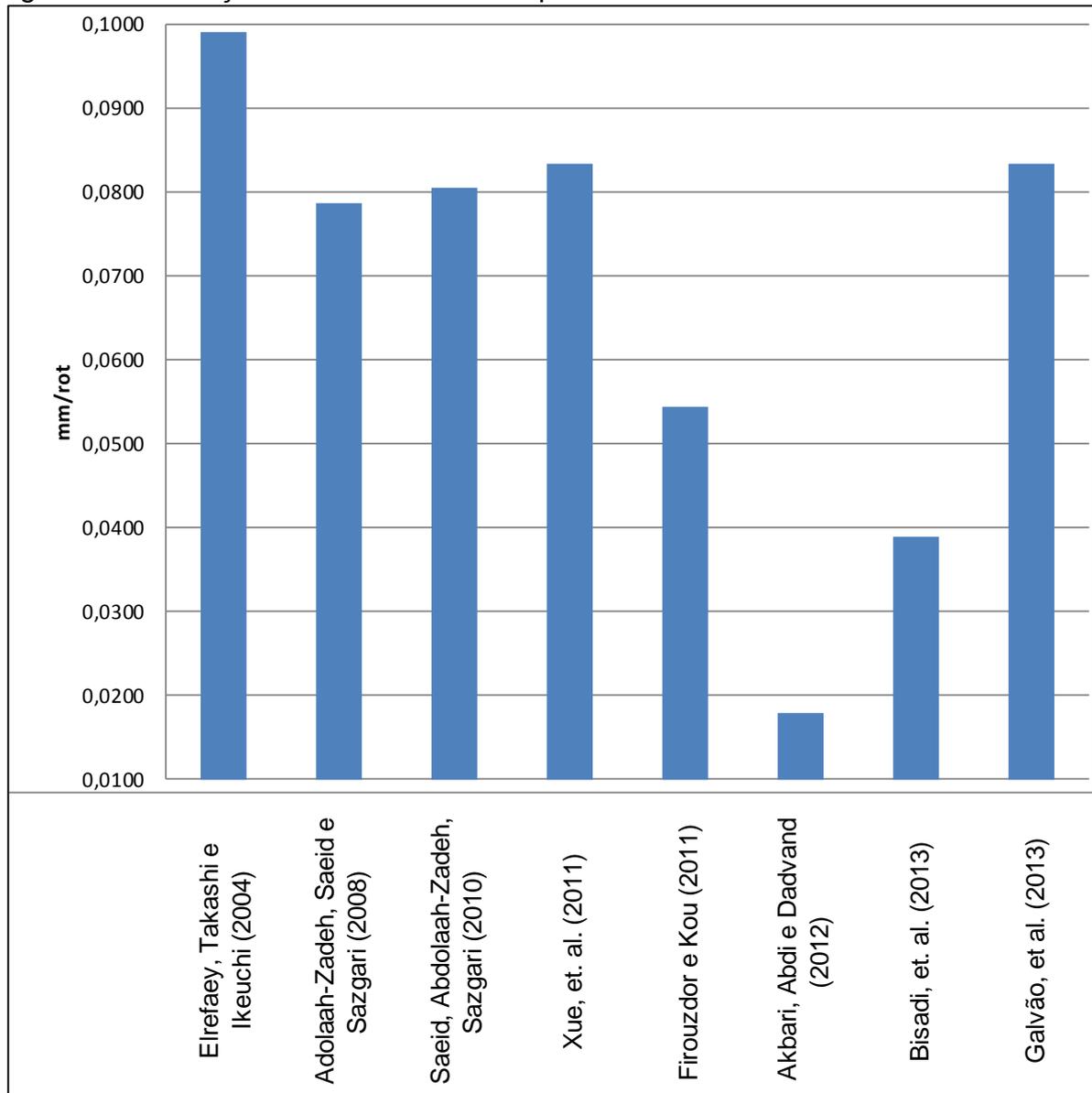
<b>Pesquisador</b>	Elrefaey, Takashi e Ikeuchi (2004)	Adolaah-Zadeh, Saeid e Sazgari (2008)	Saeid, Abdolaah-Zadeh, Sazgari (2010)	Xue, et. al. (2011)	Firouzdor e Kou (2011)	Akbari, Abdi e Dadvand (2012)	Bisadi, et. al. (2013)	Galvão, et. al. (2013)
<b>Materiais</b>	Al Al100 H24 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 6061 /Cu	Al 7070 / Cu	Al 5083 / Cu	Cu R240 / Al 6082-T6 Cu R240 / Al 5083 H111
<b>Espessuras (mm)</b>	2 - 1	4 - 3	4 - 3	3 - 3	1,6 - 1,6	2 - 2	2,5 - 3	1 - 6
<b>Rotação (rpm)</b>	2000	1500	1180	600	1400	1400	825	600
<b>Avanço (mm/min)</b>	198	118	95	50	76	25	32	50
<b>Ângulo de inclin.</b>	3°	3°	3°	—	3°	2°	3,5°	0°
<b>φ Pino (mm)</b>	—	5	5	8	4	5	5	3
<b>Comp. Pino (mm)</b>	—	6,5	6,5	4	1,6	3,5	3,8	1
<b>φ Ombro (mm)</b>	—	15	15	20	10	17,5	19	9,5
<b>mm/rot</b>	0,0990	0,0787	0,0805	0,0833	0,0543	0,0179	0,0388	0,0833

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da análise dos parâmetros de soldagem utilizados, percebe-se a discrepância de rotações e avanço que levam aos melhores resultados de soldagem. Além disso, o excesso de variáveis entre os estudos dificulta a compreensão dos fenômenos que envolvem a soldagem por fricção desses materiais dissimilares. Por exemplo, a ferramenta usada por cada pesquisador, difere muito entre eles, uns evidenciam a necessidade de se utilizar diâmetros de pino elevados, outros com estes tamanhos reduzidos.

Na Figura 12 são apresentados os valores de avanço em mm/rot (milímetro por rotação) dos trabalhos apresentados neste capítulo.

Figura 12 – Avanço em mm/rot utilizados por diferentes autores



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a faixa de valores próxima a 0,08 mm/rot pode ser uma relação de consenso entre alguns autores, porém, é possível ser apenas uma coincidência, pois os que estão nesta faixa de valor são muito distintos em relação às configurações das ferramentas e composição de materiais envolvidos.

## 2.2 Ligas de Alumínio

Em destaque nestes últimos anos, as ligas de Alumínio ganham espaço na indústria por possuírem propriedades como resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica elevadas, associadas com baixa densidade, esta com ordem de grandeza três vezes menor que a do aço, o que faz com que o Alumínio seja muito atrativo do ponto de vista da engenharia (ALCAN, 1993).

Na Tabela 2 tem-se uma relação das principais propriedades do Alumínio.

Tabela 2 – Propriedades do Alumínio

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade	2700 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade elétrica	62 %I.A.C.S
Módulo de elasticidade	68 GPa
Temperatura de fusão	660 °C

Fonte: Adaptado de Alcan (1993)

O Alumínio puro é um metal que possui resistência mecânica baixa, se comparada com a de outros metais. Mas cabe ressaltar que a adição de elementos de liga pode aumentar esta resistência substancialmente, mantendo valores de ductilidade aceitáveis. Outra característica do Alumínio e suas ligas é a formação natural de uma fina camada de óxido ( $Al_2O_3$ ) sobre sua superfície, que protege o metal contra o ataque dos mais diversos meios corrosivos, mas possui elevada dureza (ALCAN, 1993).

As famílias das ligas de Alumínio trabalháveis são divididas em séries de quatro dígitos, onde: o primeiro indica a família do principal elemento de liga; o segundo dígito indica modificações na liga original; os dois últimos dígitos indicam a liga ou a pureza do Alumínio. Dígitos estes referentes a norma NBR ISO 209:2010 (2010), apresentada na Tabela 3, cuja classificação também é adotada pela AA (*Aluminum Association*).

Tabela 3 – Classificação das ligas de Alumínio

<b>Liga ABNT (NBR ISO 209:2010)</b>	<b>Principal Elemento Químico da Liga</b>
1XXX	Alumínio não ligado, min. 99% de pureza.
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: Elaborado pelo autor

Existe ainda uma segunda classificação em função da condição de tratamento térmico. O termo “têmpera” aplicado às ligas de Alumínio representa o estado que o material adquire pela ação do trabalho a frio, a quente, por tratamento térmico ou a combinação destes. As nomenclaturas são, “F” (como fabricado), “O” (recozido), “H” (encruado), “W” (solubilizado) e “T” (tratado termicamente). A classificação em função da têmpera tratada termicamente está disponível no Quadro 1 (ALCAN, 1993).

Quadro 1 – Estados de Têmperas “T” do Alumínio

<b>Têmperas "T"</b>	<b>Estado</b>
T1	Resfriado após processo de fabricação e envelhecido naturalmente até condição estável
T2	Resfriado, deforma plasticamente a frio e por fim envelhecido naturalmente até condição estável.
T3	Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente até condição estável.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente até condição estável.
T5	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada e envelhecido artificialmente.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e estabilizado (superenvelhecimento).
T8	Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e em seguida
T10	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada, deformado plasticamente a frio e posteriormente envelhecido artificialmente.

Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.2.1 Liga Alumínio AA6060

A liga AA 6060 é típica para aplicações que envolvem extrusão de todos os tipos de perfis, até os mais complexos, devido à sua boa conformabilidade. Alguns produtos típicos encontrados no mercado são janelas, portas e corrimãos (ALCOA, 2010).

Segundo ALCOA (2010) a liga AA6060 apresenta boa resistência à corrosão e boas características de soldabilidade, apresentando temperatura liquidus de 655°C e temperatura sólidos de 615°C.

### 2.3 Ligas de Cobre

O Cobre talvez seja o metal há mais tempo utilizado pelas civilizações, e atualmente se enquadra como o terceiro mais usado no mundo, perdendo apenas para o Aço e o Alumínio. Mesmo que tenha seu preço relativamente elevado, o Cobre comercialmente puro e as ligas de Cobre ainda são insuperáveis para determinadas aplicações, devido às suas características físicas e químicas diferenciadas (INFOMET, 200-?).

Na Tabela 4 mostra-se uma relação das principais propriedades do Cobre comercialmente puro, conforme dados da INFOMET (200-?).

Tabela 4 – Propriedades do Cobre

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade	8900 kg/m <sup>3</sup>
Condutividade elétrica	100 %I.A.C.S
Módulo de elasticidade	130 GPa
Temperatura de fusão	1083 °C

Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de classificação das ligas de Cobre, adotado pela ASTM (American Society for Testing and Materials) e pela CDA (Copper Development Association), divide as ligas em função dos principais elementos de liga. Tal divisão pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das ligas de Cobre

<b>Série CDA/ASTM</b>	<b>Tipo de liga</b>
C 1XX	Cu comercialmente puro e Cu 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 (Cu-Sn, c/ ou sem fósforo)
C 6XX	Cobre-alumínio, cobre-silício
C 7XX	Cuproníquel e alpaca

Fonte: Elaborado pelo autor

As ligas de Cobre são encontradas em produtos trabalhados dos mais diversos tipos, tais como arames, placas, chapas, tiras, folhas, tubos, fio, perfis extrudados e forjados (INFOMET, 200-?).

### 2.3.1 Cobre Eletrolítico

O Cobre eletrolítico, designado como Cu C110, apresenta pureza de no mínimo 99,9% (incluindo prata). Seu campo de aplicação se estende por praticamente todos os segmentos da indústria, apresentando algumas características tecnológicas muito importantes, conforme verifica-se em dados apresentados pela COPPERMETAL (2009), que são:

- faixa de temperatura de recozimento: 475-750°C;
- faixa de temperatura para trabalho a quente: 750-875°C;
- temperatura de solidificação: 1065°C;
- conformabilidade a quente: excelente;
- conformabilidade a frio: excelente.

No estado sólido a solubilidade do Cobre é praticamente nula, de modo que todo o oxigênio permaneça contido na fase de óxido nos contornos da matriz, após a reação eutética a 1065°C. Mas vale dizer que posteriormente, os processos de fabricação, como extrusão e laminação, a estrutura fundida do Cobre modifica-se, resultando na distribuição aleatória em finas partículas, ocasionando no

insignificante efeito desta fase nas propriedades mecânicas da liga, somados ao fato do teor de oxigênio ser menor que 0,01% (INFOMET, 200-?).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Andrade (2010), a pesquisa pode ser classificada de acordo com duas finalidades: primeiro, a pesquisa que visa buscar respostas para problemas de ordem prática, gerados por exigência da vida moderna; segundo, a pesquisa com o intuito de alcançar o saber, com o desejo de adquirir conhecimento. Desta forma esta pesquisa enquadra-se como “aplicada” pois está mais precisamente na primeira classificação.

A Figura 13 apresenta a classificação deste trabalho, pois é imprescindível conhecer sua natureza, sua classificação em função da busca pelos objetivos e aos procedimentos realizados (OLIVEIRA NETTO, 2008).

Figura 13 – Tipologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

A pesquisa explicativa é considerada como complexa por Andrade (2010), na qual registra-se, analisa-se e interpreta-se os fenômenos estudados, procurando identificar os fatores determinantes e suas causas, sujeita a cometer erros. A grande parte da pesquisa explicativa utiliza o método experimental para ter a possibilidade de manipular e controlar as variáveis, com o objetivo de identificar qual variável independente determina a causa desta variável.

As classificações da pesquisa se enquadram com Gil (2009), que elenca a pesquisa como Aplicada, uma vez que o conhecimento gerado pelo trabalho possui

finalidades imediatas. Explicativa, pois visa identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos e Experimental devido à possibilidade de selecionar as variáveis que são capazes de influenciar um dado fenômeno.

A seguir, apresenta-se os materiais a serem utilizados na pesquisa, assim como os equipamentos e, em seguida, o delineamento dos experimentos e ensaios.

### 3.1 Materiais e equipamentos

#### 3.1.1 Metais de Base

Os corpos de prova consistem nos materiais Alumínio 6060 no estado T5 (ASTM 6060) e a liga de Cobre C110 no estado têmpera ½ duro (ASTM-B-187), ambos fornecidos pela empresa Irmãos Galeazi Ltda., situada em Porto Alegre (cujos certificados de autenticidade se encontram disponíveis nos ANEXO A e B). Os materiais se encontram na forma de barras retangulares nas dimensões 19,05mm de largura e 3,18mm de espessura.

Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 se encontram os valores para ambos os materiais das propriedades químicas e mecânicas.

Tabela 6 – Composição química do Alumínio 6060

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ní	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros
<b>Mín.</b>	-	0	0,35	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Máx.</b>	0,1	0	0,6	0,1	-	1	0	0	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do Alumínio 6060 T5

	Limite de Resist. (MPa)	Limite de esco. (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Condut. Elétrica (%)
<b>Mín.</b>	150	110	8	66	-
<b>Máx.</b>	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Composição química da liga de Cobre C110

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ní	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros
<b>Mín.</b>	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Máx.</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

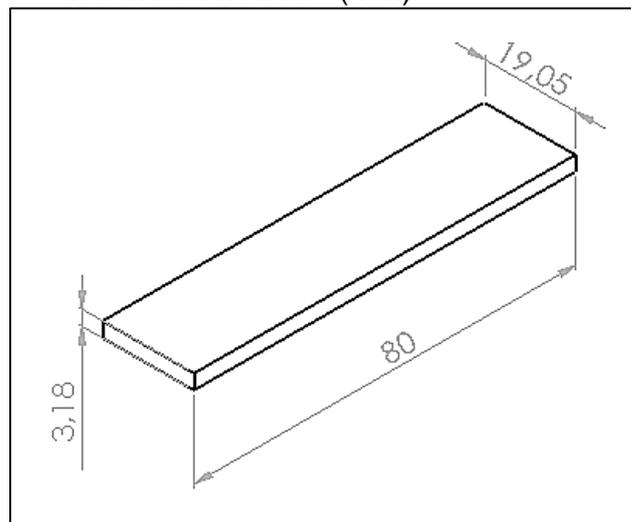
Tabela 9 –Propriedades mecânicas da liga de Cobre C110 ½ duro

	Limite de Resist. (MPa)	Limite de esco. (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Condut. Elétrica (%)
<b>Mín.</b>	314	265	6	90	99
<b>Máx.</b>	373	333,5	12	105	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a preparação das juntas, realizou-se o seccionamento das barras e posterior remoção de rebarbas das arestas, resultando em um comprimento de 80 mm. As dimensões finais das barras encontram-se melhor visualizadas na Figura 14.

Figura 14 – Dimensões dos materiais base (mm)



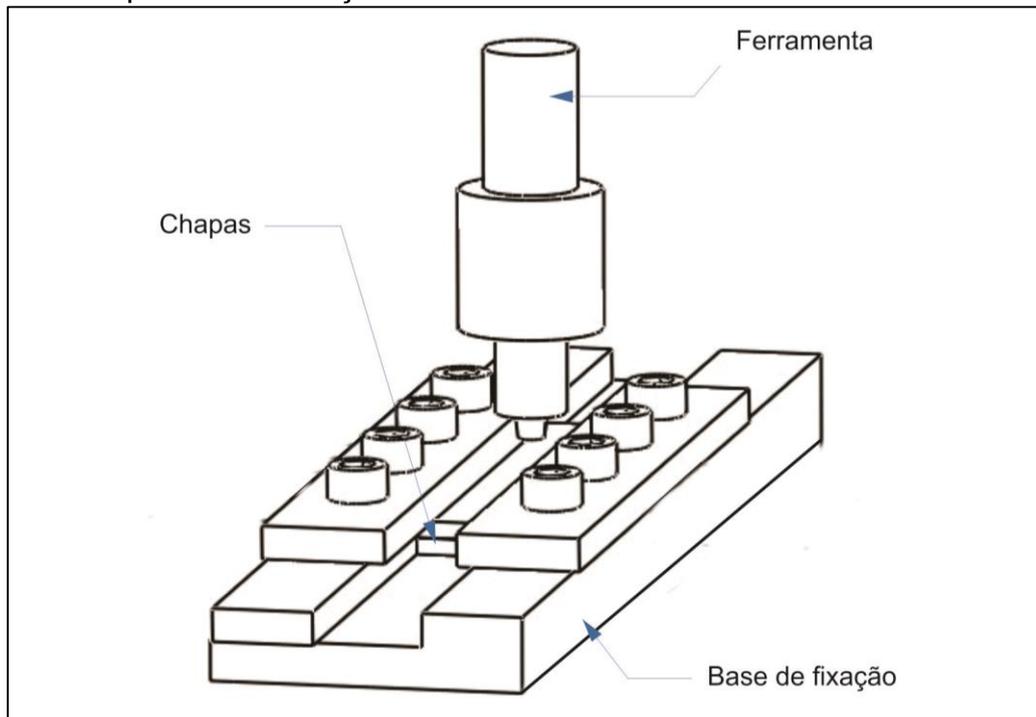
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.2 Dispositivo de fixação

Elemento fundamental na execução de uma boa soldagem, o dispositivo de fixação é responsável por manter as chapas unidas, não permitindo movimentos em qualquer direção durante a execução da soldagem. Uma vez que os esforços envolvidos no processo *FSW* são elevados, a restrição do movimento deve ser severa para evitar descontinuidades na junta.

O desenho esquemático do dispositivo de fixação utilizado para os experimentos está posto na Figura 15.

Figura 15 – Dispositivo de fixação



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 15 mostra o esquema da disposição das chapas fixadas pelo dispositivo, para permitir a soldagem, juntamente com a posição da ferramenta.

O dispositivo foi usinado com um ângulo da base de  $3^\circ$  para permitir implementar o ângulo de inclinação na soldagem, uma vez que o centro de usinagem não possibilita por si só executar este ângulo.

### 3.1.3 Equipamento

As soldagens foram realizadas em um centro de usinagem CNC da marca ROMI, modelo D 800, que pode ser observado na Figura 16, caracterizado como centro de usinagem vertical CNC GE Fanuc oi-MC, com potência instalada do motor principal de 15 kW e potência total de 30 kW, com faixa de rotação entre 7 e 7500 rpm. Esta máquina pertence à Universidade Federal do Pampa e está localizada no Campus Tecnológico de Alegrete, Rio Grande do Sul, onde são feitos os experimentos.

Figura 16 – Centro de usinagem CNC ROMI D 800



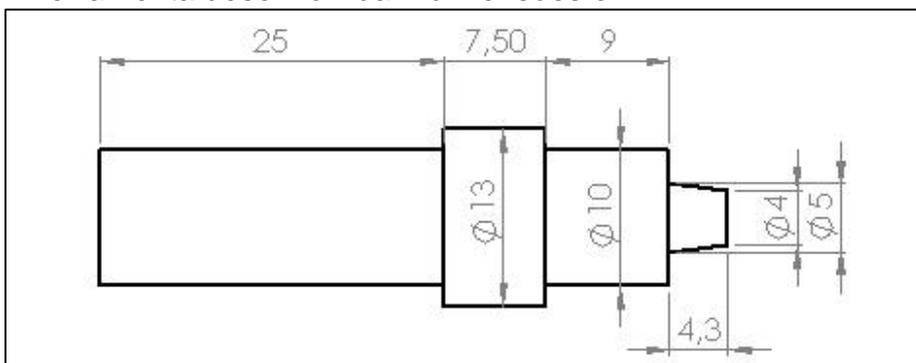
Fonte: Elaborado pelo autor

A escolha deste equipamento para realizar as soldagens é em razão da disponibilidade e da capacidade do mesmo executar as operações com segurança em função dos esforços exercidos. Esta máquina oferece robustez e rigidez suficientes para desempenhar as operações de soldagem *FSW*.

### 3.1.4 Ferramenta

As combinações de geometria da ferramenta foram realizadas respeitando as relações dimensionais descritas no tópico 2.1.3 (Geometria da Ferramenta). A Figura 17 apresenta as relações geométricas da ferramenta desenvolvida.

Figura 17 – Ferramenta desenvolvida – dimensões em mm



Fonte: Elaborado pelo autor

A ferramenta possui um pino cônico com 4 mm de diâmetro menor e 5 mm de diâmetro maior ao plano do ombro, e um comprimento de 4,3 mm. O ombro possui superfície plana de diâmetro 10 mm. A região com diâmetro de 13 mm após o ombro consiste no ressalto que delimita a entrada da ferramenta no cabeçote da máquina CNC.

O material da ferramenta é um aço rápido ABNT M2, usinado a partir de uma barra com diâmetro de 18 mm, em torno convencional disponível no laboratório de máquinas da UNIPAMPA. Após a usinagem, a ferramenta foi tratada termicamente: endurecida por têmpera completa e duplo revenido. Como resultado tem-se que a dureza da ferramenta situa-se entre 48 e 55 HC.

### **3.2 Delineamento dos experimentos e ensaios**

A seleção dos experimentos e ensaios, assim como os parâmetros de soldagem, foi feita em função do estudo bibliográfico prévio, experiência dos autores em trabalhos anteriores, pré-testes e equipamentos disponibilizados pela universidade.

As particularidades das relações dos experimentos, que são abordadas neste capítulo, são:

- posição das chapas;
- rotação e avanço;
- translação da ferramenta.

E os ensaios:

- inspeção visual;
- ensaio de cisalhamento;
- ensaio de microdureza e macrografias.

#### **3.2.1 Posição das chapas**

O estudo realizado e apontado ao longo da revisão bibliográfica, ressalta que o posicionamento entre as chapas de Alumínio e Cobre, deve ser feito em razão da

maciez dos materiais, pois o material mais macio favorece a penetração do pino proporcionando menores esforços no ferramental.

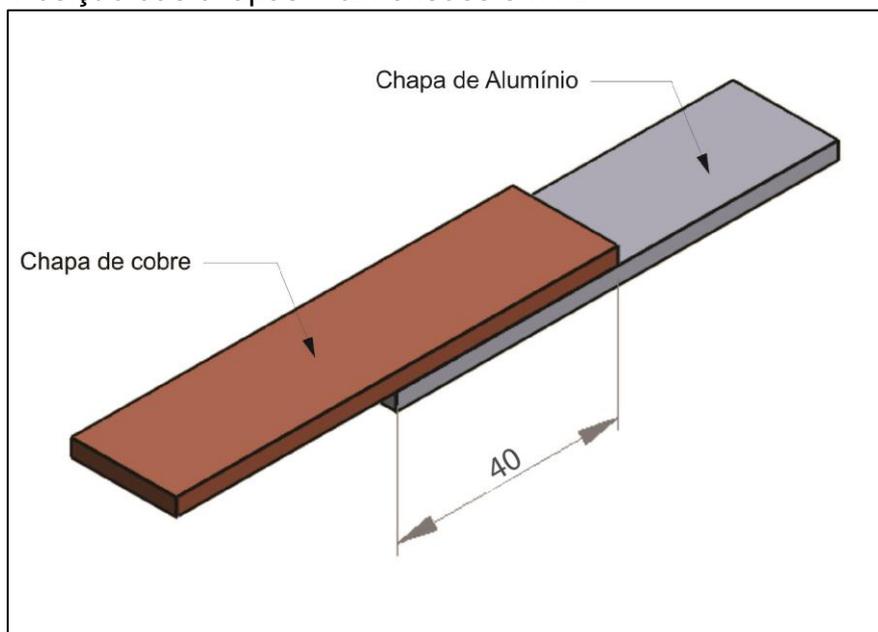
Executaram-se pré-testes que consistiram na inspeção visual de soldagens, alternando-se o posicionamento das chapas. Os melhores resultados obtidos foram alcançados através do Cobre na posição superior. O ombro em contato com o Alumínio gerou excesso de vazios e descontinuidades para os parâmetros ajustados.

A camada de óxido criada na superfície do Alumínio 6060 T5 dificulta a execução da soldagem se colocada na posição superior, atribuindo-se a essa camada um maior aporte térmico para promover uma boa soldagem, se colocada na posição inferior o calor gerado pela ferramenta até encontrar o início da chapa de Alumínio é suficiente.

Os aspectos resultantes da região soldada fazem com que se opte em usar a chapa de Cobre sobre a chapa de Alumínio, tal como Galvão et al.(2013), uma vez que o equipamento utilizado para a soldagem é suficientemente robusto para esta configuração.

A Figura 18 ilustra o posicionamento das chapas utilizado nas soldagens.

Figura 18 – Posição das chapas – dimensões em mm



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.2 Rotação e velocidade de avanço

A rotação e velocidade de avanço são dois parâmetros que influenciam diretamente na qualidade da junta soldada. Para delimitar um menor número de parâmetros a serem variados e seus resultados avaliados neste trabalho, decidiu-se por definir um avanço constante, escolhido através de pré-testes.

Os pré-testes indicaram que o avanço que apresentou a menor ausência de vazios e defeitos foi em torno de 10 mm/min. Velocidades menores resultaram no aspecto muito escurecido da zona de mistura e em distorções das chapas devido ao excessivo aporte de energia térmica. Já para velocidades maiores, os vazios e cavidades se fizeram presentes.

Diferentes rotações podem produzir resultados divergentes entre os sistemas confrontados neste trabalho, portanto variou-se esse parâmetro em quatro velocidades: 800, 900, 1000 e 1100 rpm, e o avanço definido em 10 mm/min para todos os casos.

Não variaram-se outras velocidades de avanço em função da quantidade de ensaios resultantes na seleção de muitas variáveis, o que impossibilitaria a execução de todos os ensaios previstos no tempo hábil para a elaboração do trabalho.

### 3.2.3 Translação da ferramenta

Adotou-se dois tipos de translação da ferramenta, também conhecido como caminho da solda, o primeiro sistema com o avanço normal, classificado em “sistema convencional” e o segundo tipo classificado como “sistema dois recuos” que possui os recuos na translação da ferramenta.

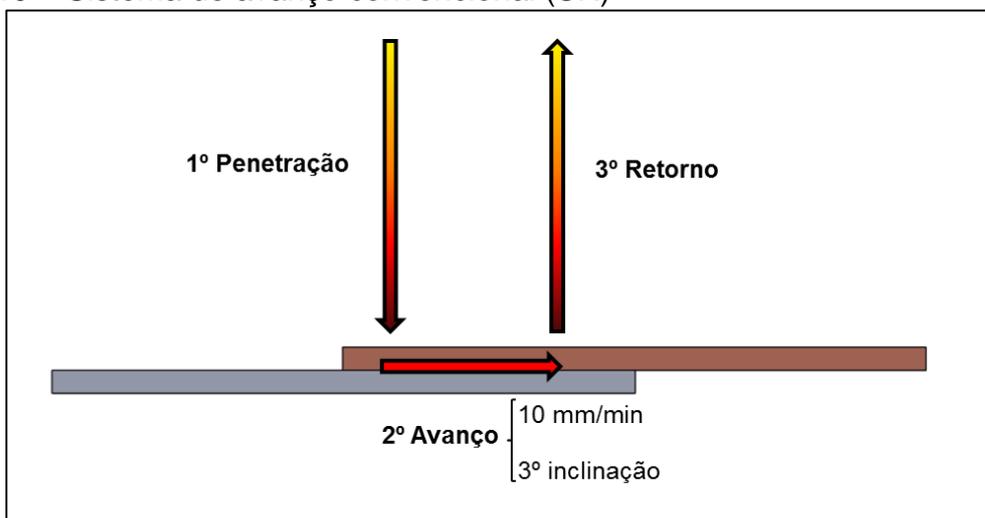
O sistema convencional é interpretado dos trabalhos disponíveis na literatura, em que o procedimento é explicado conforme a Figura 19. Já o de duplo recuo é proposto nesta pesquisa, como um novo sistema, até então ainda não encontrado na literatura.

Para ambos os sistemas – convencional e dois recuos, será utilizado o ângulo de inclinação de 3° da ferramenta no sentido de avanço e profundidade de

penetração do ombro de 0,2 mm. Os procedimentos realizados estão ilustrados nas Figuras 19, 20, 21 e 22. O modelo do sistema convencional é basicamente o método de translação da ferramenta realizado pelos pesquisadores encontrados na literatura estudada.

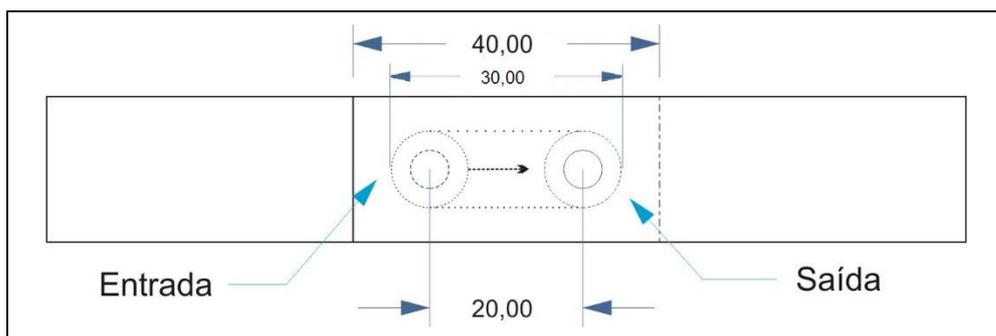
Como no sistema convencional o recuo da ferramenta não existe, adota-se a simplificação da nomenclatura para “Sem Recuo” (SR) e o segundo sistema por possuir, de “Duplo Recuo” (DR).

Figura 19 – Sistema de avanço convencional (SR)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Sistema de avanço convencional (SR): Vista superior – dimensões em mm



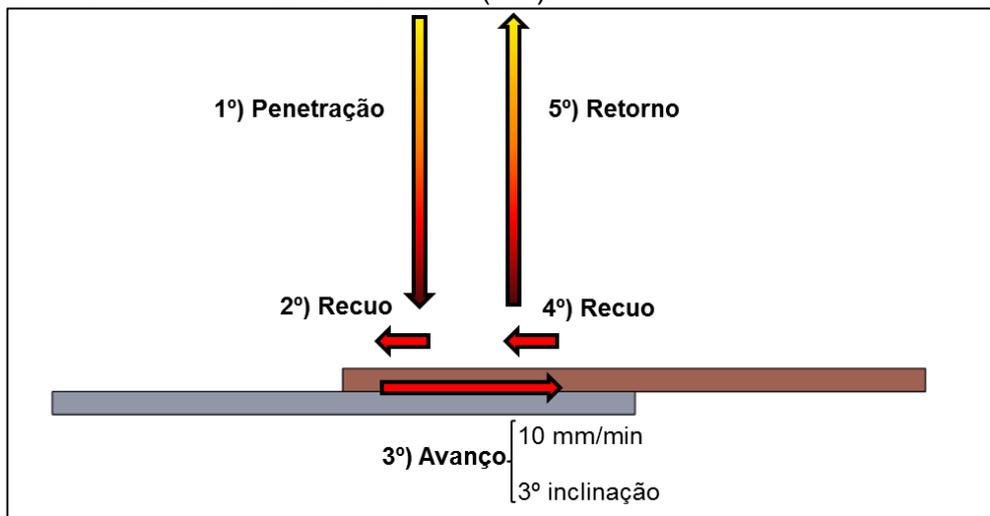
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o sistema convencional, conforme ilustrado nas Figuras 19 e 20, realiza-se a penetração da ferramenta, em um segundo momento o avanço e no terceiro momento o retorno da ferramenta, também descrito como “Saída” na Figura 20. Todas estas etapas executadas com a velocidade de avanço de 10 mm/min.

O comprimento da zona transladada será de 30 mm em função do diâmetro do ombro (10 mm), isto implica na distância entre os centros de 20 mm conforme ilustrada na Figura 20.

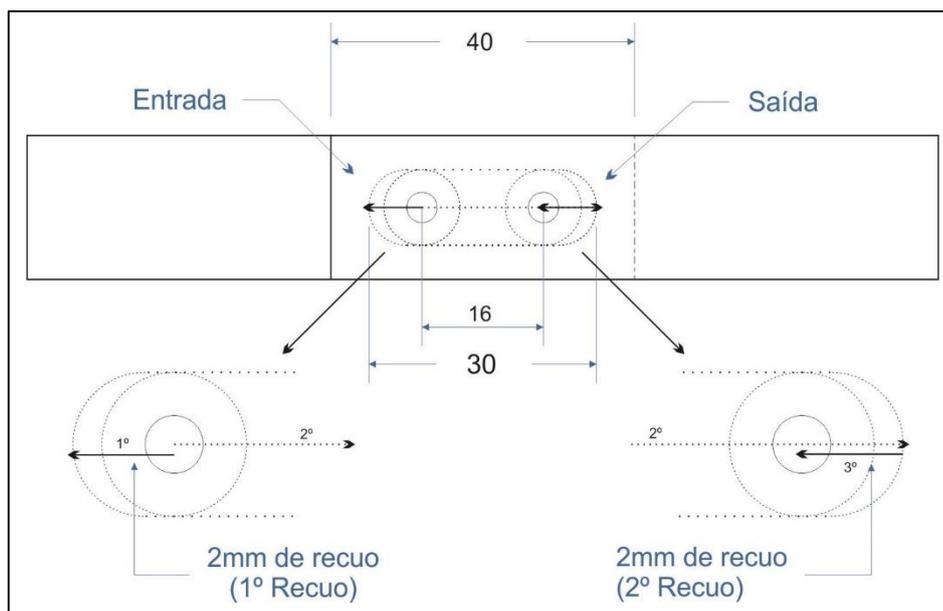
No sistema de dois recuos modificou-se o caminho do avanço, realizando maior mistura com o retrabalho mecânico do material nas duas extremidades dos cordões de solda através do recuo da ferramenta. Este sistema é ilustrado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Sistema de com dois recuos (DR)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Sistema de avanço com dois recuos (DR): vista superior – dimensões em mm



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível verificar pela Figura 21 e 22 a ordem de execução da translação da ferramenta durante a soldagem pelo sistema de DR, sempre com velocidade de 10mm/min:

- 1) a ferramenta penetra na chapa com a rotação definida sempre no mesmo sentido;
- 2) após penetrar, a ferramenta executa um recuo de 2mm;
- 3) realiza-se um avanço de 20 mm no sentido do término da zona a soldar;
- 4) após realizar toda a extensão da soldagem a ferramenta recua 2mm para o centro da zona soldada, resultando em uma distância de 18 mm entre os pontos de penetração e saída da ferramenta.

Comparando os sistemas SR e DR, tem-se que as extensões das zonas soldadas são iguais para os dois casos, juntamente com a mesma velocidade de avanço e ângulo de inclinação, apenas se diferenciam pela presença dos recuos.

### 3.2.4 Relação dos parâmetros

Para estabelecer uma classificação entre os experimentos de soldagens que foram realizados, estabelece-se uma ordem em função dos sistemas e rotações variadas no estudo, dispostas na Tabela 10.

Tabela 10 – Relação dos parâmetros

	<b>Rotação (rpm)</b>			
	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>	<b>1100</b>
<b>Sistema SR</b>	SR 800	SR 900	SR 1000	SR 1100
<b>Sistema DR</b>	DR 800	DR 900	DR 1000	DR 1100

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 10 elenca os experimentos em de acordo com as modificações ordem crescente de rotação e sistemas (SR e DR), para que possam ser relacionados os resultados das amostras de acordo com os respectivos parâmetros utilizados. Por exemplo: os resultados provenientes do “Sistema DR 900”, são frutos da soldagem realizada com a presença dos dois recuos de 2mm, em uma rotação de 900 rpm com ângulo de inclinação da ferramenta em 3°.

### 3.2.5 Ensaio

Os ensaios são necessários para obter dados a fim de qualificar e avaliar a eficácia das uniões soldadas. É através dos testes que o pesquisador consegue comprovar ou pôr fim a especulações.

Para este trabalho é possível realizar ensaios de cisalhamento, macrografias e ensaios de microdureza, tendo em vista a viabilidade dos equipamentos disponíveis na UNIPAMPA.

#### 3.2.5.1 Inspeção Visual

A constatação visual da eficácia da união é a primeira análise realizada nos corpos de prova soldados. A partir da inspeção visual do cordão de solda é possível averiguar a presença de cavidades, de trincas, de excesso de rebarbas, entre outros defeitos.

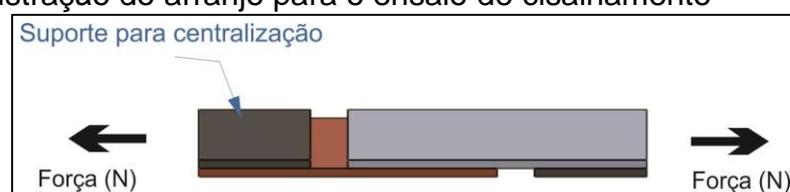
Esta etapa seleciona os corpos de prova que são submetidos ao posterior ensaio de cisalhamento. Uma vez que um determinado corpo de prova soldado sob algum parâmetro previsto não desenvolver uma união eficaz, constatada visualmente, o ensaio de cisalhamento do mesmo não se faz necessário.

#### 3.2.5.2 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento serve para quantificar a resistência da união, com resultado dado em Newtons (N). Os valores registrados para os corpos de prova são confrontados entre si para se chegar aos dois melhores resultados, um para o Sistema SR e outro para o Sistema DR.

O esquema de como é realizado ensaio de cisalhamento está ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Ilustração do arranjo para o ensaio de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor

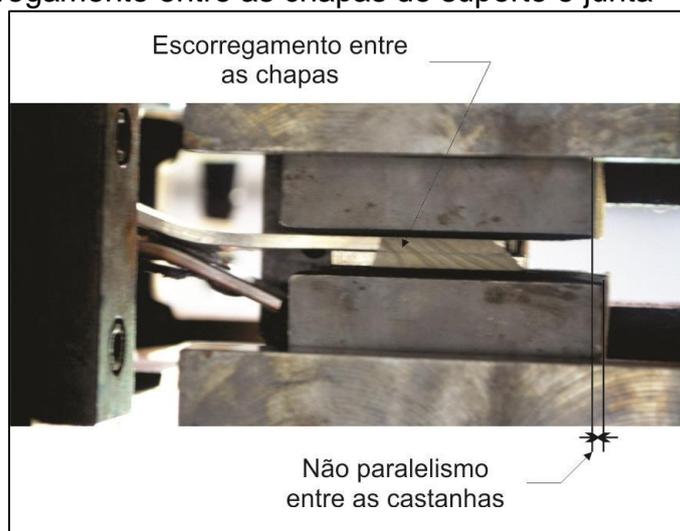
A máquina utilizada é a EMIC modelo DL 20000, disponível na UNIPAMPA campus Alegrete. A velocidade de deslocamento é definida em 1mm/min e a deformação obtida é a disponibilizada pela própria máquina, ou seja, levando em conta as deformações dos mecanismos de sujeição dos corpos de prova.

A impossibilidade de utilizar o *clip gage* para obter a deformação real da junta foi devida à imprevisibilidade de rompimento da união, podendo vir a danificá-lo durante o ensaio. Além disso, o *clip gage* disponível no laboratório necessita de mais espaço para ser instrumentado, pois os corpos de prova posicionados nas garras da máquina deixavam o espaço entre elas de no máximo 50 mm, uma distância insuficiente.

Os primeiros corpos de prova ensaiados apresentaram um problema no sistema do suporte de centralização das juntas, onde houve o escorregamento entre a chapa da junta e o suporte de centralização. Tal ocorrência pode ser vista na Figura 24.

O escorregamento começou a ser notado: pela distorção da fita adesiva utilizada para facilitar a instrumentação dos componentes para o ensaio, pela diferença das distâncias de posicionamento finais apresentados pelas castanhas e pela interrupção automática do sistema da máquina.

Figura 24 – Escorregamento entre as chapas de suporte e junta



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados em que ocorreu esse problema foram descartados e novas juntas foram soldadas para refazer esses ensaios. O escorregamento entre as

chapas foi solucionado pela adição de um pedaço de lixa para aumentar o atrito entre as superfícies e impedir o movimento relativo entre as chapas.

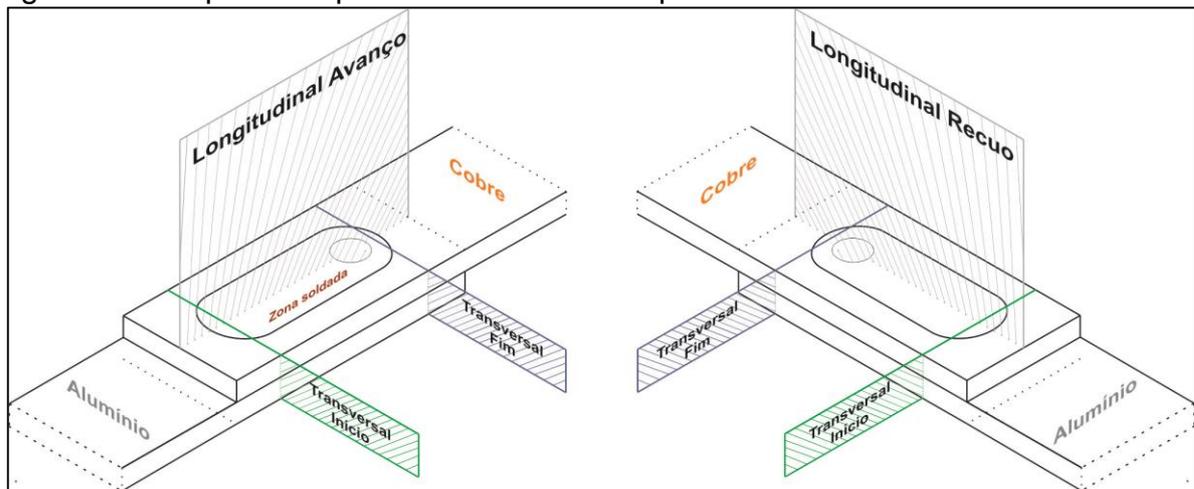
A espessura das lixas utilizadas é de aproximadamente 0,3 mm, podendo ser desconsiderado qualquer efeito do desalinhamento dos corpos de prova em função das lixas pois esse é quase nulo, não exercendo qualquer influência nos resultados, ao contrário, as lixas permitiram a execução dos mesmos.

### 3.2.5.3 Ensaios de Microdureza e Macrografias

Os ensaios de microdureza visaram a identificação das regiões formadas na soldagem além da investigação em função dos IMCs que apresentam durezas elevadas.

As seções que foram avaliadas estão representadas na Figura 25.

Figura 25 – Superfícies para análise macroscópica e microdureza



Fonte: Elaborado pelo autor

Os cortes longitudinais, realizados simetricamente nos corpos de prova, originaram duas superfícies devido à espessura da serra de corte, uma para o lado de avanço da zona de mistura e outro para o lado de recuo, como visto na Figura 25.

As superfícies transversais serão trabalhadas próximas aos pontos externos de início e fim da soldagem, referentes à penetração e saída da ferramenta. Regiões estas onde espera-se obter diferenças significativas de microdureza entre os sistemas de soldagem, pois é esperada maior formação de IMCs no sistema de DR.

A carga utilizada para as medições de microdureza é de 300 gramas, aplicada durante 15 segundos no microdurômetro Micromet 6010 da BUEHLER.

As macrografias são necessárias para averiguar as condições das uniões metalúrgicas: o fluxo de material, a mistura entre os materiais e a presença de vazios, túneis, etc.

Para possibilitar a microscopia ótica, seriam necessários dois ataques com reagentes químicos distintos: solução aquosa de 0,5% de ácido fluorídrico para revelar o Alumínio; para revelar o Cobre uma solução de iguais proporções entre água destilada ( $H_2O$ ), hidróxido de amônia ( $NH_4OH$ ) e água oxigenada ( $H_2O_2$ ).

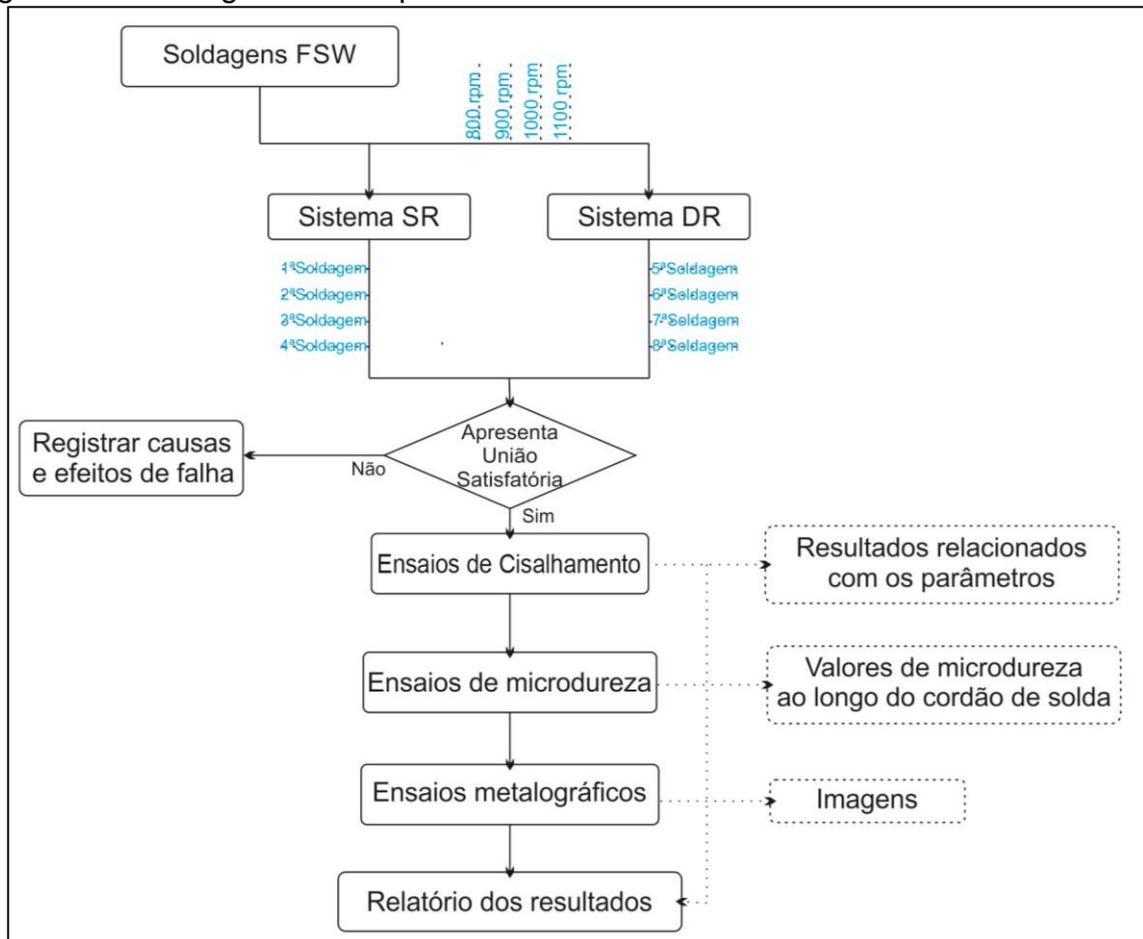
O procedimento de obtenção das imagens metalográficas é realizado em três etapas: a primeira consiste em polir a amostra e atacá-la com a solução reagente ao Cobre e captar a imagem resultante; na segunda etapa é feito outro polimento e ataca-se o Alumínio, uma segunda imagem microscópica é obtida; a terceira etapa consiste em sobrepor as duas imagens.

Como os reagentes não foram adquiridos não foi possível obter as microestruturas para a identificação das zonas. Consequentemente não foi possível identificar recristalizações, tamanho de grão, alinhamento de óxidos, entre outros aspectos, porém para os objetivos requeridos imagens sem ataque químico suprem as necessidades da identificação geral do fluxo de material e vazios.

### **3.2.6 Fluxograma dos experimentos**

Para facilitar a visualização do fluxo de experimentos, apresenta-se na Figura 26 um fluxograma sequencial das atividades.

Figura 26 – Fluxograma de experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor

Entende-se o fluxograma como um conjunto de atividades que são executadas seguindo uma lógica programada. Primeiramente realizou-se, perante dois sistemas (SR e DR), soldagens sob quatro diferentes parâmetros de rotação.

Visualmente fez-se uma triagem entre os corpos de prova que apresentaram ou não união satisfatória, para então prosseguir com os ensaios de cisalhamento nas soldagens satisfatórias.

Através dos resultados de cisalhamento previa-se selecionar dois de melhor performance: um do sistema SR e outro do sistema DR, para com estes prosseguir com os outros ensaios previstos de microdureza e macrografias. Porém, como é explicado no capítulo de resultados, o sistema DR não apresentou uma rotação ótima.

A partir dos dados registrados redigiu-se o relatório dos resultados.

### 3.2.7 Cronograma de experimentos

O cronograma das atividades e tarefas planejadas e seguidas está disposto no Quadro 2. Os meses de Setembro a Janeiro corresponderam ao 2º semestre letivo do ano de 2014.

Quadro 2 – Cronograma de atividades

Atividade	Tarefa	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.
Preparação das amostras (Soldagem)	Programação (CNC)	x				
	Testes iniciais	x				
	Sistema SR 800 rpm		x			
	Sistema SR 900 rpm		x			
	Sistema SR 1000 rpm		x			
	Sistema SR 1100 rpm		x			
	Sistema DR 800 rpm		x			
	Sistema DR 900 rpm		x			
	Sistema DR 1000 rpm		x			
	Sistema DR 1100 rpm		x			
Ensaio de Cisalhamento	Sistema SR 800 rpm			x		
	Sistema SR 900 rpm			x		
	Sistema SR 1000 rpm			x		
	Sistema SR 1100 rpm			x		
	Sistema DR 800 rpm			x		
	Sistema DR 900 rpm			x		
	Sistema DR 1000 rpm			x		
	Sistema DR 1100 rpm			x		
Macrografias	Sistema SR (melhor resultado)				x	
	Sistema DR				x	
Ensaio de Microdureza	Sistema SR (melhor resultado)				x	
	Sistema DR				x	
Redigir Relatórios	Resultados					x
	Conclusões					x

Fonte: Elaborado pelo autor

O cronograma foi realizado com base em experiência, e foi fundamental para o controle do andamento da pesquisa tendo como base as atividades a serem realizadas e o prazo de entrega do trabalho.

Os maiores atrasos no cronograma foram nas etapas dos ensaios de cisalhamento em função de problemas na máquina – as oscilações na rede elétrica de Alegrete impediam a realização dos ensaios nos horários de maior consumo energético pois eram interrompidos e os corpos de prova descartados devido aos desligamentos da máquina.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

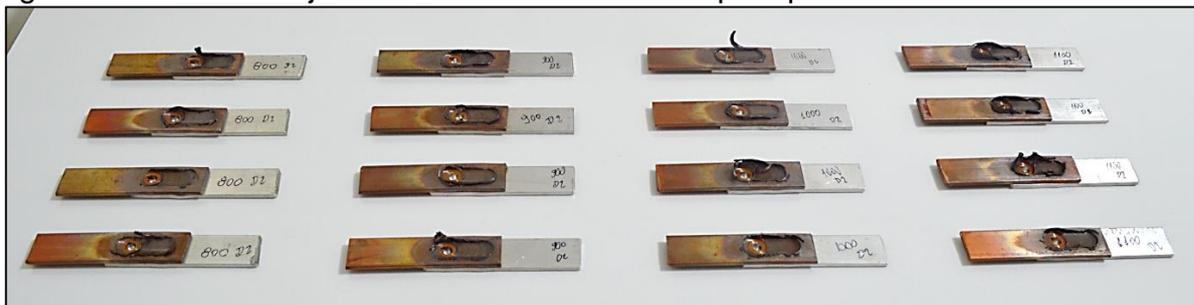
### 4.1 Soldagens FSW

Todas as soldagens efetuadas nos dois sistemas (SR e DR) resultaram em juntas com uniões metalúrgicas satisfatórias quando visualmente inspecionadas. Os parâmetros de soldagem consistem em uma janela, a priori, que produz bons resultados.

Os únicos defeitos constatados visualmente foram as rebarbas presentes em todas as amostras. Este defeito está provavelmente atrelado à geometria plana do ombro que permite certa expulsão do material da zona de soldagem, o que não deixa de ser inerente à soldagem executando-se com penetração do ombro de 0,2 mm.

As primeiras amostras soldadas pelo sistema DR estão dispostas na Figura 27. Nota-se as rebarbas e o aspecto escurecido das zonas de mistura devido ao efeito da temperatura. Os parâmetros de soldagem para ambos os sistemas não geraram vazios muito menos tuneis possíveis de serem verificados superficialmente.

Figura 27 – Primeiras juntas dissimilares soldadas pelo processo FSW.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.2 Ensaio de Cisalhamento

Mesmo tendo sido descartados os resultados dos corpos de prova que apresentaram escorregamento, e novos ensaios os tenham substituído para totalizarem tréplicas para cada parâmetro, não se obterá qualquer conclusão acerca do deslocamento horizontal das curvas que representam a deformação.

Em função da não utilização do dispositivo de obtenção da deformação real da junta, serão desprezados os resultados das deformações obtidas pela máquina.

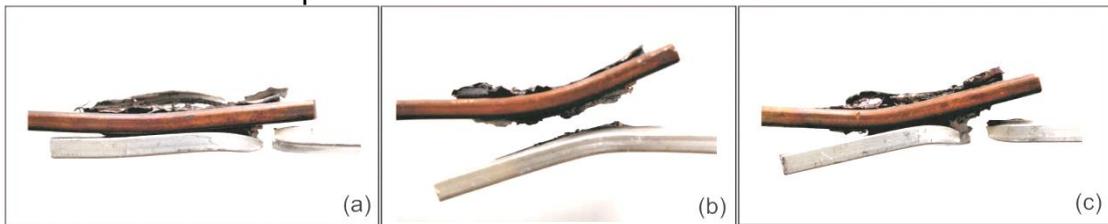
Para evitar o escorregamento nos estágios iniciais do ensaio, convencionou-se utilizar uma pré-carga de aproximadamente 640 N. Tal valor não se manteve constante, o que pode ser visto no estado de deformação “zero”. Isto decorreu da impossibilidade de configurar automaticamente este valor, tendo que ser feito manualmente através do comando de descida lenta do travessão.

Ensaando os corpos de prova percebeu-se diferenciações nos modos de falha dos mesmos. Em uns o cordão de solda permanecia intacto dando a ideia de superdimensionamento, outros emitiam o som característico da propagação de trincas e fraturavam totalmente diferentes, indicando diferenças significativas na qualidade das juntas.

Classificou-se os modos de falha dos corpos de prova de todos os ensaios, da seguinte forma, procurando obter maior compreensão das soldas:

1. Rompimento do metal base do Alumínio na região de penetração da ferramenta, apresentando comportamento moderadamente dúctil devido ao empescoçamento parcial do metal base: “Modo 1”, ilustrado pela Figura 28 (a).
2. Rasgamento da zona soldada em função da distorção angular e propagação de trincas iniciadas nas extremidades: “Modo 2”, ilustrado pela Figura 28 (b).
3. Rompimento da chapa de Alumínio com semelhança ao primeiro modo de falha porém com alta distorção angular e fratura parcialmente dúctil iniciada na região soldada. Ocorreu o levantamento das chapas entre as extremidades de penetração e saída da ferramenta: “Modo 3”, como pode ser visto na Figura 28 (c).

Figura 28 – Modos de ruptura nos ensaios de cisalhamento



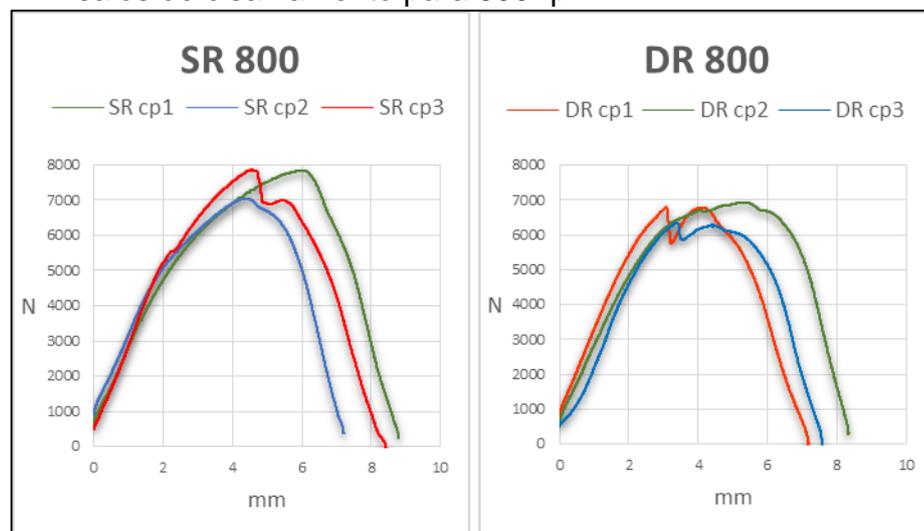
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 28 nota-se:

- Em “(a)” a zona soldada permaneceu intacta o suficiente para que o metal base do Alumínio, somado aos concentradores de tensões do cordão de solda, atingisse seu limite elástico, iniciasse a estricção e rompesse de forma dúctil.
- Em “(b)” a falha iniciada nas extremidades propagou-se ao longo do cordão de solda, gerando o aspecto de rasgamento da solda ilustrado na figura.
- Em “(c)” a falha iniciada na extremidade de saída da ferramenta não se propaga ao longo de todo o cordão de solda, pois a resistência do Alumínio chega em seu limite. Tem-se neste caso um modo de ruptura misto entre os modos 1 e 2.

A figura 29 ilustra os resultados do ensaio de cisalhamento para a rotação de 800 rpm para os sistemas SR e DR.

Figura 29 – Ensaio de cisalhamento para 800 rpm



Fonte: Elaborado pelo autor

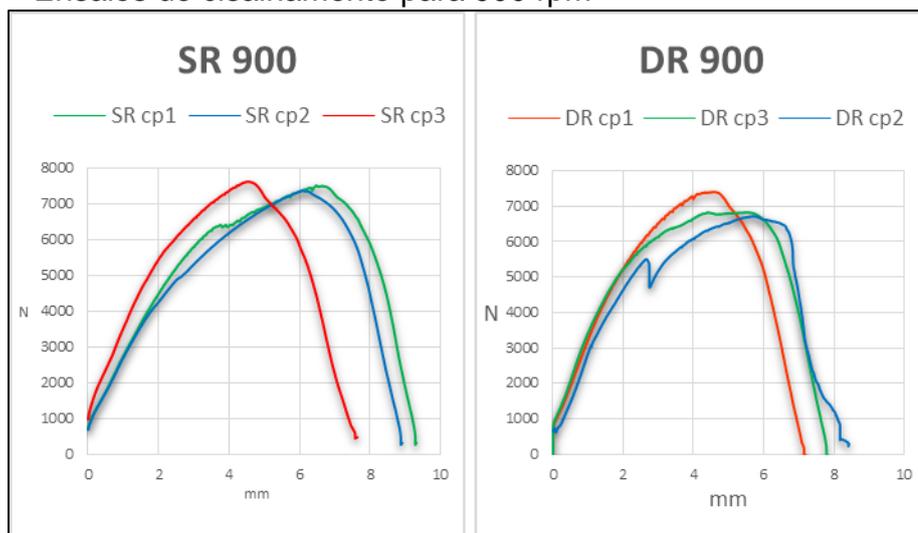
Na Figura 29, já é possível identificar os modos de falha descritos como “1” e “2”. Para as curvas de SR tem-se que as falhas são características de um rompimento dúctil do metal base de Alumínio. Porém em DR nota-se para o cp1 uma diferenciação da curva de carregamento às demais, pois ela apresentou o modo de rompimento “2”.

Em DR cp1, a medida que o corpo de prova foi submetido ao carregamento, iniciou-se uma trinca que propagou-se ao longo da solda. Durante o rasgamento da junta, as zonas de maior resistência (centro do cordão) possibilitaram um novo aumento do carregamento, dando à curva a característica de dois picos.

Comparando DR cp1 com DR cp3 na Figura 29, subentende-se que eles tiveram o mesmo comportamento, porém cp3 rompeu no metal base e o que ocasionou a primeira queda na curva foi o levantamento dos extremos do cordão e a deformação angular do corpo de prova. A trinca iniciada não propagou no centro do cordão e a estrição no metal base ocorreu antes do arrancamento da solda (Modo 3).

A Figura 30 ilustra os resultados para os ensaios de cisalhamento para as soldagens efetuadas sob os dois sistemas, SR e DR com a rotação de 900 rpm

Figura 30 – Ensaio de cisalhamento para 900 rpm

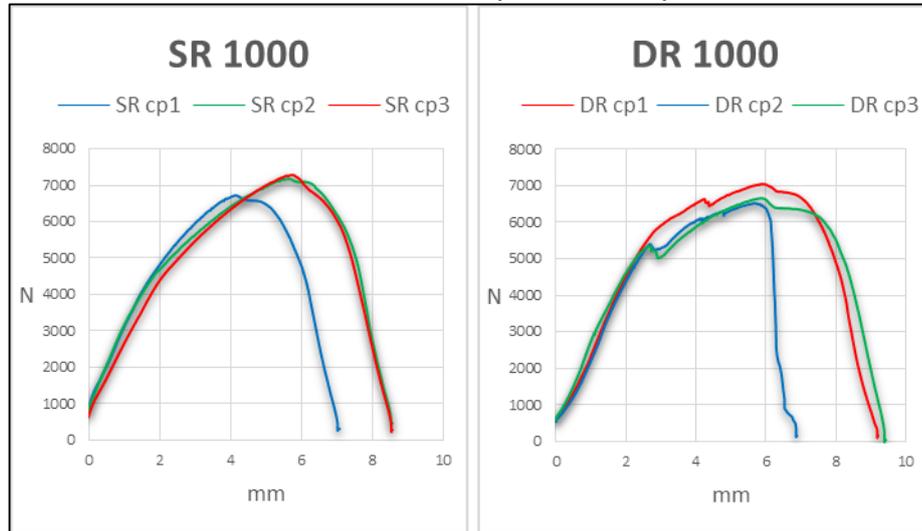


Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os corpos de prova na Figura 30 romperam no metal base do Alumínio com exceção do DR cp2 (Modo 2), indicando novamente certa aleatoriedade no modo de falha para o sistema de duplo recuo.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento para as rotações de 1000 rpm estão ilustrados na Figura 31.

Figura 31 – Ensaio de cisalhamento para 1000 rpm

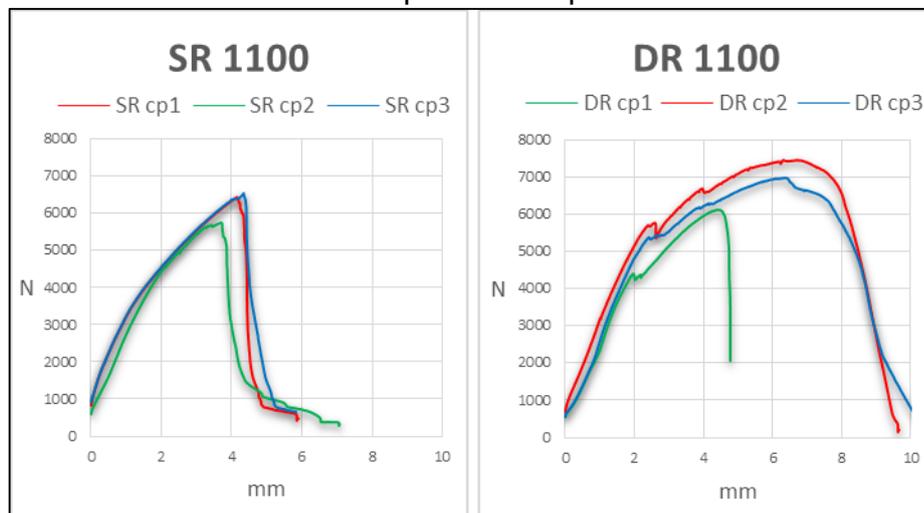


Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente para o sistema SR os corpos de prova romperam no metal base (Modo 1). Apenas DR cp2 rompeu segundo o Modo 2. Portanto, é notável a diferença entre as curvas de SR e DR, para DR observa-se mais propagações de falhas pelas consecutivas quedas e aumento de carregamento.

A Figura 32 ilustra as curvas de cisalhamento para as juntas soldadas com 1100 rpm.

Figura 32 – Ensaio de cisalhamento para 1100 rpm



Fonte: Elaborado pelo autor

Usando 1100 rpm a soldagem pelo sistema sem recuo resultou puramente no modo de falha 2, indicando supostamente que este valor de rotação seja um limite superior nos parâmetros adotados, pois as falhas foram catastróficas.

Para DR cp2 e cp3 na Figura 32, a zona soldada supera a resistência limite do metal base do Alumínio, e os mesmos rompem pelo modo de falha 3. Já em DR cp1 ocorreu o rasgamento da união.

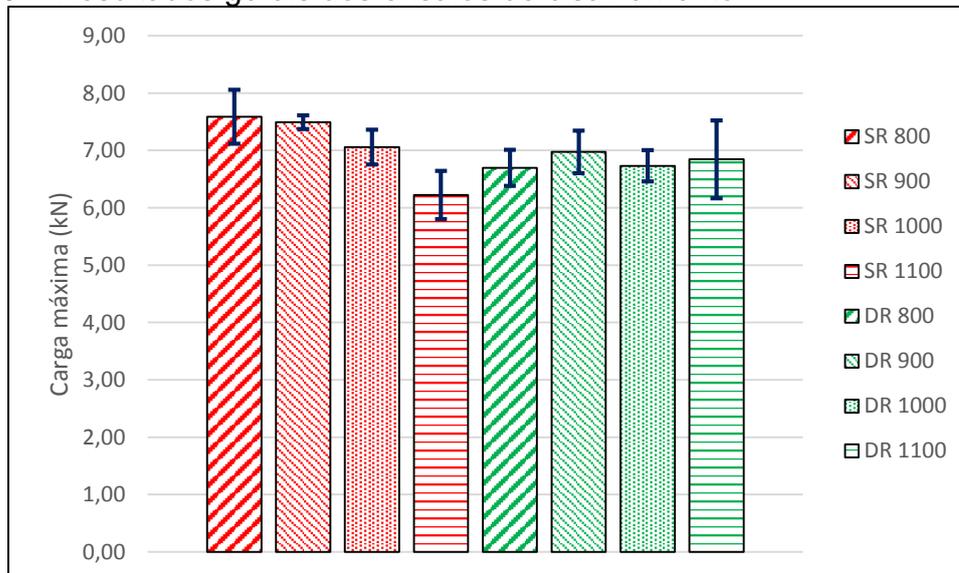
Compilando todos os resultados e calculando as respectivas médias e desvios padrão (S) para cada amostragem dos diferentes parâmetros, tem-se na Tabela 11 estes valores, e em forma de gráfico de barras na Figura 33.

Tabela 11 – Resultados gerais dos ensaios de cisalhamento

Rotação (rpm)	SR		DR	
	Média (kN)	S (kN)	Média (kN)	S (kN)
<b>800</b>	7,59	0,47	6,70	0,31
<b>900</b>	7,49	0,12	6,98	0,37
<b>1000</b>	7,06	0,30	6,73	0,27
<b>1100</b>	6,22	0,42	6,85	0,68

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Resultados gerais dos ensaios de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Acerca da Tabela 11 e Figura 33, pode-se observar:

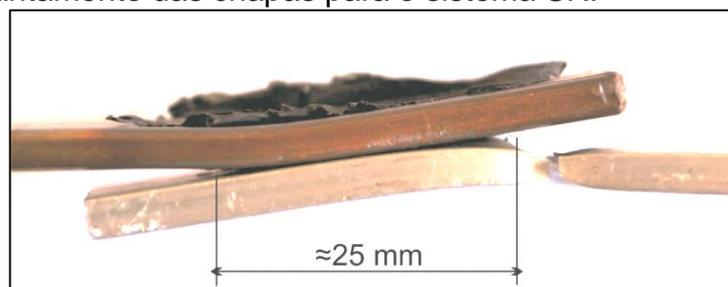
- As médias de resistência máxima dos corpos de prova de SR mantiveram-se maiores que em DR, exceto para 1100 rpm.

- Em termos de confiabilidade, o parâmetro de 900 rpm no sistema SR resultou no menor desvio padrão entre os resultados. Desta forma ele representa os melhores resultados no ensaio de cisalhamento monotônico pois possuem resistência mecânica elevada aliada com maior confiança.
- É possível ver que a resistência mecânica das juntas no sistema SR é inversamente proporcional ao aumento da rotação entre as rotações de 800, 900 e 1000 rpm em que os corpos de prova fraturaram no mesmo modo (“1”). Deduz-se que isso é devido ao aumento da temperatura e seus efeitos negativos na ZTA.
- Os resultados de DR são compostos pelos diferentes modos de falha em cada rotação. Desta forma, diferentemente de SR, não é possível relacionar proporcionalidade entre a média de resistência e a variação de rotação.
- Analisando os ensaios para DR, supõem-se que esta janela de soldagem, entre 800 – 1000 rpm, gera resultados semelhantes. Assim como em SR o parâmetro de 1100 rpm não gerou uma soldagem eficiente, mas não visto pela média de resistência, que é semelhante aos anteriores, e sim pelo alto valor do desvio padrão (680 N).

A grande diferença notada nos ensaios de cisalhamento transcende os resultados numéricos de resistência. Os corpos de prova de DR que romperam no metal base do Alumínio diferenciaram-se de SR, podendo ser bem divididos entre: Modo 1 para SR e Modo 3 para DR.

A distância do cordão de solda que permaneceu intacta no Modo 1 varia aproximadamente entre 20 e 25 mm, como pode ser visto na Figura 34.

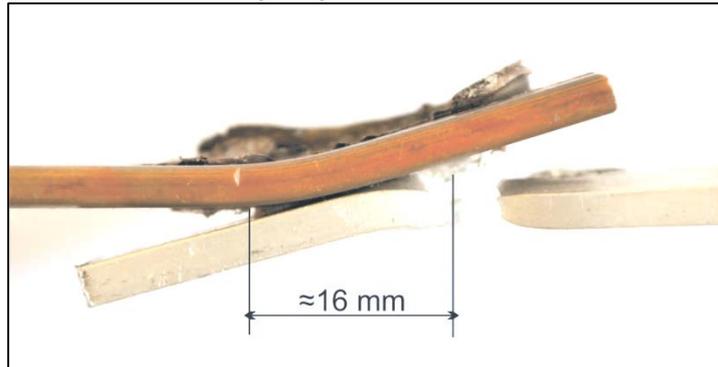
Figura 34 – Levantamento das chapas para o sistema SR.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em DR, a distância do cordão de solda que permaneceu intacta apresentou valores menores antes do rompimento, indicando uma menor área resistiva. As distâncias para o “Modo de falha 3” se encontram no entorno de 16 mm, basicamente a distância entre os pontos de penetração e saída da ferramenta neste sistema, como ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Levantamento das chapas para o sistema DR.



Fonte: Elaborado pelo autor

Pouco se consegue retirar quantitativamente dos resultados de resistência mecânica de juntas que fraturaram de modos diferentes, porém os corpos de prova rompidos bem demonstram qualitativamente as diferenças entre os sistemas.

Outro aspecto notável nas regiões de falha dos modos 1 e 3 é a relativa diferença de mistura e zona soldada no entorno da extremidade do pino na região de penetração da ferramenta. Neste aspecto para os sistemas DR as zonas de mistura representaram maior adesão das chapas, indicadas pela característica irregular do material em oposição ao aspecto “liso” da região fraturada em SR, conforme pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 – Adesão no entorno da penetração da ferramenta.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na “Figura 36 (a)” é representada a zona de fratura de uma junta soldada sem o recuo da ferramenta, resultando no aspecto liso no envoltório do botão de entrada da ferramenta. Em (b) o aspecto corrugado dos materiais indica maior adesão na soldagem no envoltório do botão de entrada ocasionado pelo recuo.

O ensaio monotônico acaba por não avaliar completamente a diferença na resistência da junta soldada com 2 recuos, pois devido à condição de distorção angular que a junta sofre as regiões de recuo são as primeiras a romperem.

Conforme previu-se na metodologia, selecionar-se-ia o melhor parâmetro de soldagem para cada sistema em função dos resultados de cisalhamento, para prosseguir com os próximos ensaios:

- Para SR em que os corpos de prova obtiveram basicamente os mesmos modos de falha é possível selecionar a rotação de 900 rpm como a ótima, em função do menor desvio padrão entre os resultados, fazendo este parâmetro ter maior confiabilidade.
- Para DR a janela de soldagem 800-1000 rpm gerou resultados semelhantes, impossibilitando elencar a rotação de maior destaque.

#### **4.3 Macrografias e Microdurezas**

Para as medições de distribuições de microdureza foram preparados somente os corpos de prova longitudinais, que após terem sido cortados não apresentaram vazios para o caso de DR.

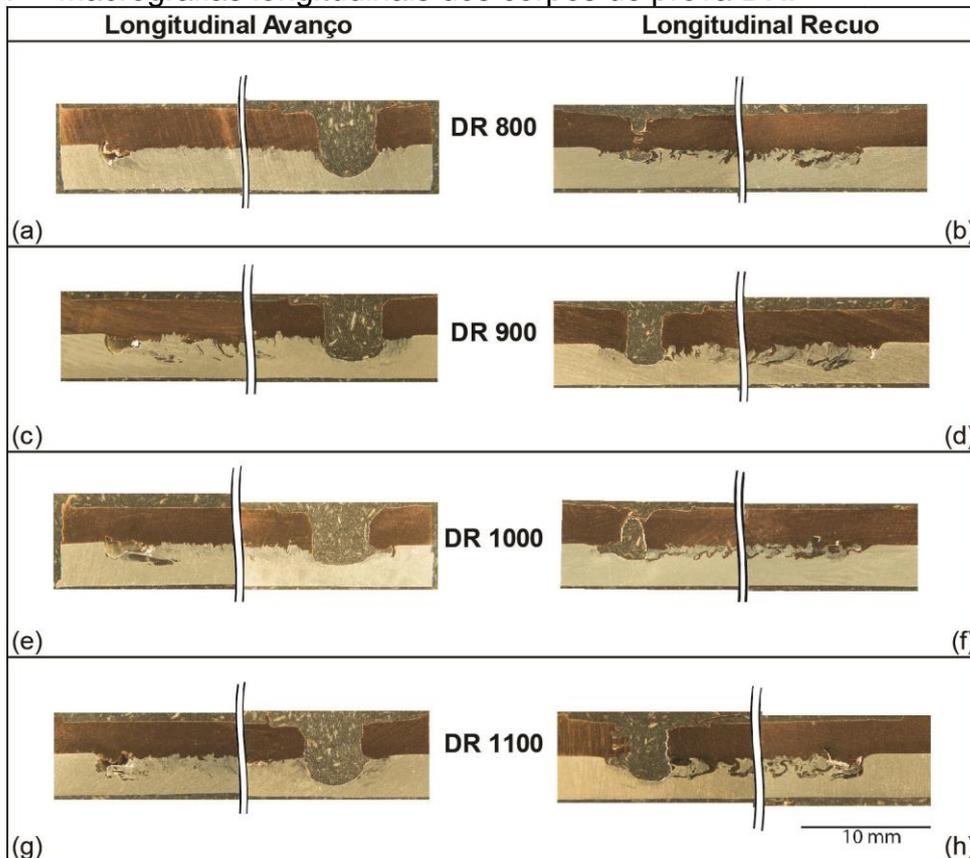
Perde-se o sentido em verificar as propriedades de uma zona soldada que pelos mesmos parâmetros pode vir a gerar novos vazios na região de interesse.

A Figura 37 elenca as imagens das macroestruturas longitudinais sem ataque químico dos corpos de prova a serem submetidos aos ensaios de microdureza.

Para compreender a origem das amostras longitudinais de Avanço e Recuo, sugere-se retornar à Figura 26, uma vez que cada junta soldada origina duas superfícies após o corte em simetria longitudinal.

A preparação metalográfica revela as diferenças entre os lados de avanço e recuo conforme aponta o estudo bibliográfico, devido aos sentidos concordantes e discordantes do movimento de translação e rotação da ferramenta, resultando na assimetria metalúrgica da soldagem *FSW*.

Figura 37 – Macrografias longitudinais dos corpos de prova DR.



Fonte: Elaborado pelo autor

Da Figura 37 pode-se verificar:

- Os lados de avanço corresponderam à maior presença de discontinuidades nas zonas de recuo, tanto inicial como final.
- Nota-se o crescimento das zonas misturadas nas regiões centrais com o aumento da rotação, comparando (b) com (h) esta diferença é evidenciada, pois a maior rotação gerou maior heterogeneidade devido ao aumento da velocidade do fluxo de material.
- Mesmo que os vazios nos recuos sejam mais evidentes nos lados de avanço, as regiões centrais (entre os pontos de início e fim) apresentam um progresso constante e homogêneo na mistura translacional.
- A presença dos vazios nos recuos de início e/ou fim em todas as amostras é um indicativo do resultado da mudança nos modos de falha dos ensaios de cisalhamento, pois desta forma as áreas resistentes foram diminuídas.

Desta forma tem-se no Quadro 03 o indicativo de presença ou não de vazios nas áreas de interesse, que são as zonas de recuo.

Quadro 3 – Indicativo de vazios nas zonas de recuo.

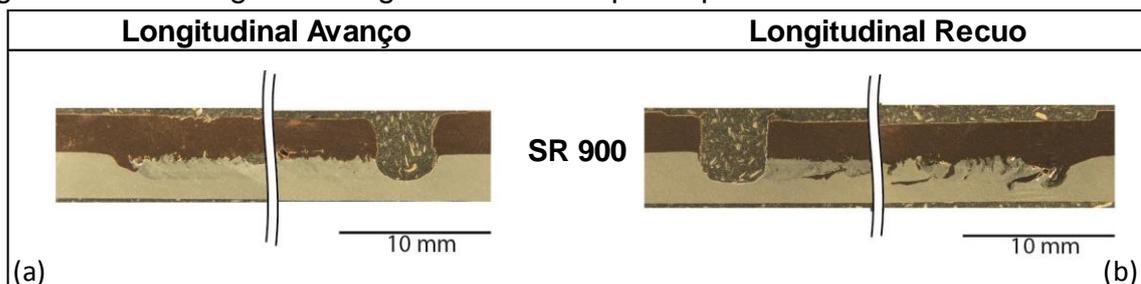
Rotação (rpm)	Longitudinal Avanço		Longitudinal Recuo	
	Recuo Inicial	Recuo Final	Recuo Inicial	Recuo Final
<b>800</b>	Vazio	Ok	Ok	Ok
<b>900</b>	Vazio	Ok	Ok	Ok
<b>1000</b>	Vazio	Vazio	Ok	Vazio
<b>1100</b>	Vazio	Vazio	Vazio	Vazio

Fonte: Elaborado pelo autor

- A análise das zonas de recuo indicam que as soldagens utilizando os dois recuos apresentaram vazios, sem exceção em todas as rotações. Como os cortes foram executados na direção longitudinal ao centro dos cordões de solda, a presença ou não do defeito em ambos os lados (lado de avanço ou lado de recuo) depende do tamanho e posicionamento deste vazio.
- O lado de avanço, conforme indicado no Quadro 03, apresenta maior incidência de defeitos. Desta forma os corpos de prova selecionados para as medições de microdureza são os referentes ao lado de recuo nas rotações de 800, 900 e 1000 rpm.

Como o sistema sem recuo apresentou resultados convergentes do melhor parâmetro de rotação nos ensaios de cisalhamento para o valor de 900 rpm, a Figura 38 ilustra as macrografias longitudinais sem ataque químico do corpo de prova soldado pelos parâmetros de SR 900.

Figura 38 – Macrografias longitudinais de corpo de prova SR 900



Fonte: Elaborado pelo autor

As imagens disponibilizadas na Figura 38 ilustram a presença de um pequeno vazio deixado após a soldagem no ponto de penetração da ferramenta em (b). Porém se comparado aos corpos de prova soldados com duplo recuo, o sistema convencional gerou uma união soldada mais satisfatória.

Os vazios deixados nas zonas centrais dos cordões de solda não são avaliados, o objetivo de comparar as amostras entre os sistemas SR e DR é focado nas zonas de extremidade dos cordões.

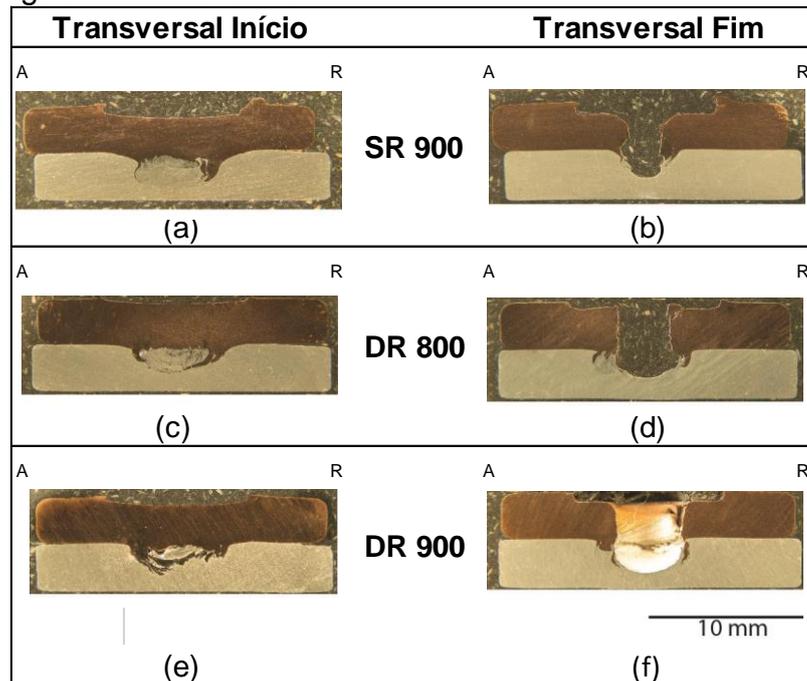
A não remoção dos vazios nas áreas recuadas no sistema DR é atribuída principalmente ao ângulo de inclinação da ferramenta. A ação do recuo ocorre com este ângulo com seu valor “negativo” de  $3^\circ$ , pois não é possível pelos dispositivos adotados modificar o ângulo de inclinação no momento do recuo.

No início da soldagem ocorre a elevação da temperatura, no momento do recuo o ângulo de inclinação ocasiona a expulsão do material da zona de mistura diminuindo a espessura da chapa superior. Quando os sentidos se invertem para começar o avanço geral, a ferramenta não executa força de forjamento suficiente para eliminar o vazio de início. E isso se confirma com o aumento da rotação, pois com temperaturas maiores o material mais amolecido é expulso com maior facilidade.

Os vazios deixados ao final do recuo ocorrem seguindo a mesma lógica anterior, do ângulo de inclinação da ferramenta, com a diferença na ordem de execução do avanço e recuo, este executado ao final, ou seja, o avanço geral da ferramenta é executado primeiramente e o recuo já não exerce tanta influência nas características da solda, pois as chapas já foram anteriormente unidas. Porém, os recuos nas rotações elevadas (1000 e 1100 rpm) ocasionaram estes vazios devido ao aumento da temperatura.

Transversalmente, as macrografias realizadas nas seções de entrada e saída da ferramenta, apresentadas na Figura 39, foram realizadas em ambos os sistemas (SR e DR). Como as amostras não foram atacadas quimicamente não é possível constatar as zonas (ZTA, ZTMA, *nugget* e MB), apenas o fluxo de material na mistura.

Figura 39 – Macrografias transversais.



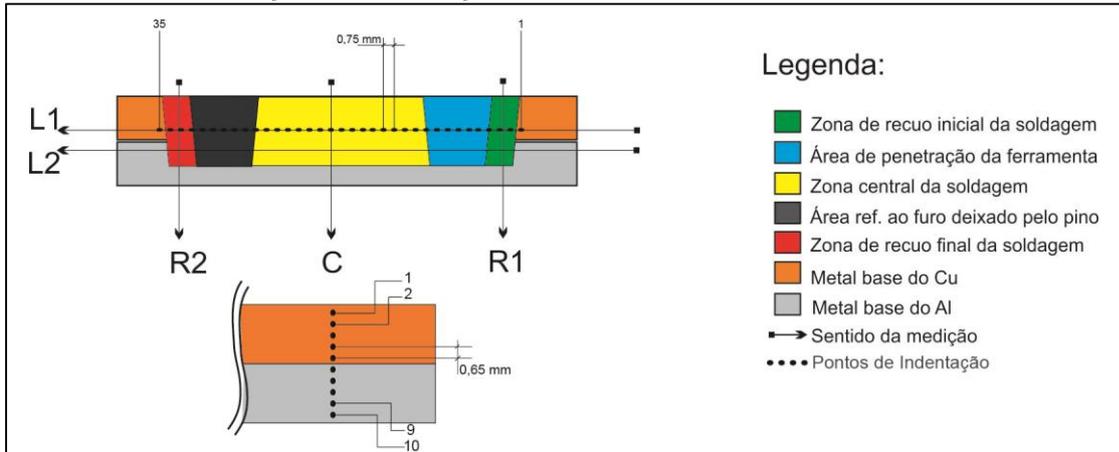
Fonte: Elaborado pelo autor

Os lados de avanço e recuo estão representados na Figura 39 pelas letras “A” e “R” acima das macrografias. Podem ser discutidas as seguintes indagações:

- As imagens (a), (c) e (e) que representam as seções iniciais das juntas ilustram o efeito do recuo. Em (a) pode ser vista a diferença entre os lados de avanço e recuo, com o maior penetração do Cobre em R. Já em (c) e (e) ocorre maior simetria entre os lados A e R, sendo mais evidente na rotação de 900 rpm. Isso ocorre pela inversão do fluxo de material durante a realização do recuo.
- Como a seção transversal final de SR 900 foi realizada ligeiramente deslocada para a extremidade, notado pelo menor tamanho do furo em (b) não é possível compará-la com o sistema DR, porém em (d) percebe-se a penetração simétrica do Cobre nos lados A e R devido à inversão do fluxo de material.

A Figura 40 ilustra as codificações implementadas para facilitar a representação dos gráficos de distribuição da microdureza para as corpos de prova que apresentam os recuos.

Figura 40 – Classificação das medições de microdureza.



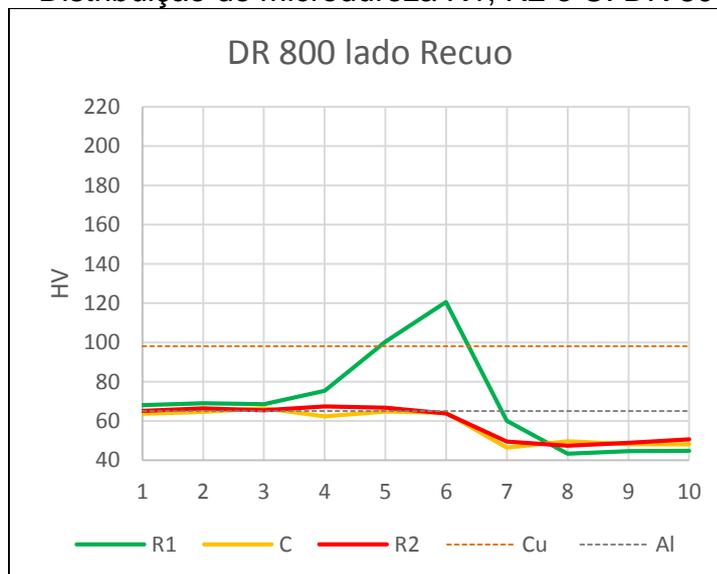
Fonte: Elaboração própria.

A partir dos caminhos de medições L1, L2, R1, R2 e C ilustrados na Figura 40 objetiva-se:

- Em L1 e L2 medir as flutuações longitudinais na zona soldada (“nugget”). Os pontos de indentações (1 a 35) são espaçados em 0,75 mm entre cada medição.
- Em R1, R2 e C medir as variações de microdureza partindo do Cobre até o Alumínio, com a intenção de comparar estas regiões entre si, considerando que “C” é semelhante em ambos os sistemas SR e DR. Os pontos de indentações (1 a 10) são espaçados em 0,65 mm entre cada medição.

Na Figura 41 é apresentada a distribuição de microdureza das regiões R1, R2 e C do corpo de prova soldado com a rotação de 800 rpm.

Figura 41 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 800



Fonte: Elaborado pelo autor

Para as medições de microdureza ilustradas na Figura 41 nota-se a diminuição da dureza do Alumínio e do Cobre nas zonas mais distantes da interface das chapas, ou seja nos pontos 1, 2 e 3 para o Cu e 8, 9 e 10 para o Al.

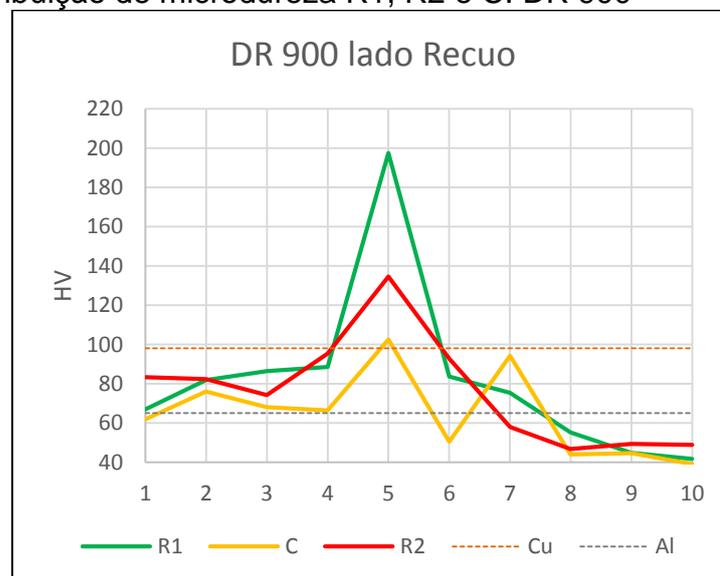
As durezas dos metais de base foram medidas de 98 HV0.3 para o Cu e de 65 HV0.3 para o Al (indicadas pelas linhas pontilhadas). Isso indica que longe da interface das chapas houve uma redução de dureza na ordem de 33% no Cobre e 26% no Alumínio.

As diminuições de dureza são atribuídas à elevação das temperaturas para próximas à faixa de recozimento do Cobre e próximas à de solubilização do Alumínio.

Já os pontos, na Figura 41, na zona de interface das chapas de Al e Cu, são atribuídos consequentemente a medidas realizadas sobre intermetálicos duros, pois esta é uma das únicas interpretações possíveis para os valores medidos, na literatura.

Na Figura 42 são ilustradas as distribuições de dureza para zonas do corpo de prova soldado com 900 rpm.

Figura 42 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 900



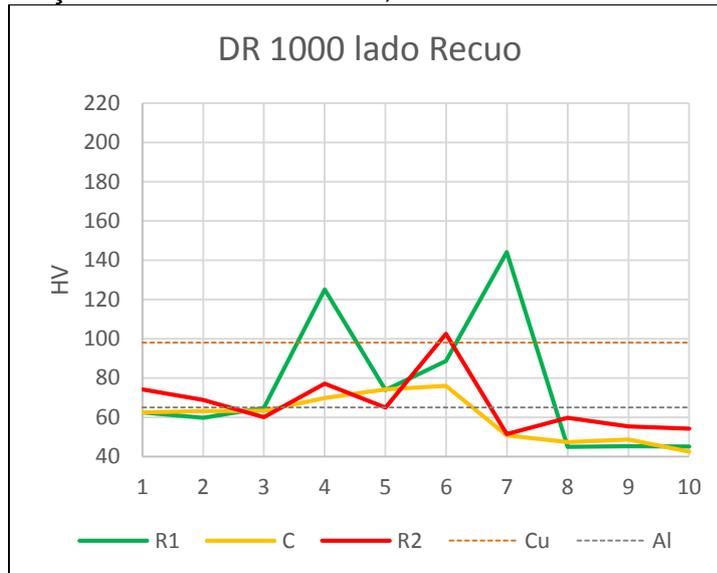
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o caso dos pontos distantes à interface de soldagem seguem as mesmas proporções de redução de dureza do Cobre e do Alumínio para a rotação de 900 rpm.

A diferença em relação à menor rotação é a maior incidência de picos de dureza medidos nesta rotação e o sensível distanciamento entre as curvas de “R1” e “R2” comparados com “C”.

A seguir são apresentadas, na Figura 43 as curvas de dureza medidas em amostra soldada à 1000 rpm.

Figura 43 – Distribuição de microdureza R1, R2 e C: DR 1000



Fonte: Elaborado pelo autor

A 1000 rpm, de acordo com as medições ilustradas na Figura 43, houve maior incidência de pontos com dureza elevada (acima de 100 HV) com ênfase na ampliação do tamanho da zona de mistura na interface das chapas, pois como é notado mediu-se pontos de maior dureza em 4 e 7, fato que não ocorreu em 800 rpm.

Realizando um confronto entre as medições de R1, R2 e C, nas Figuras 41, 42 e 43, é notável que nas três diferentes rotações a região de recuo inicial apresentou maior incidência de picos de dureza, uma vez que as curvas de R1 são superiores às demais curvas.

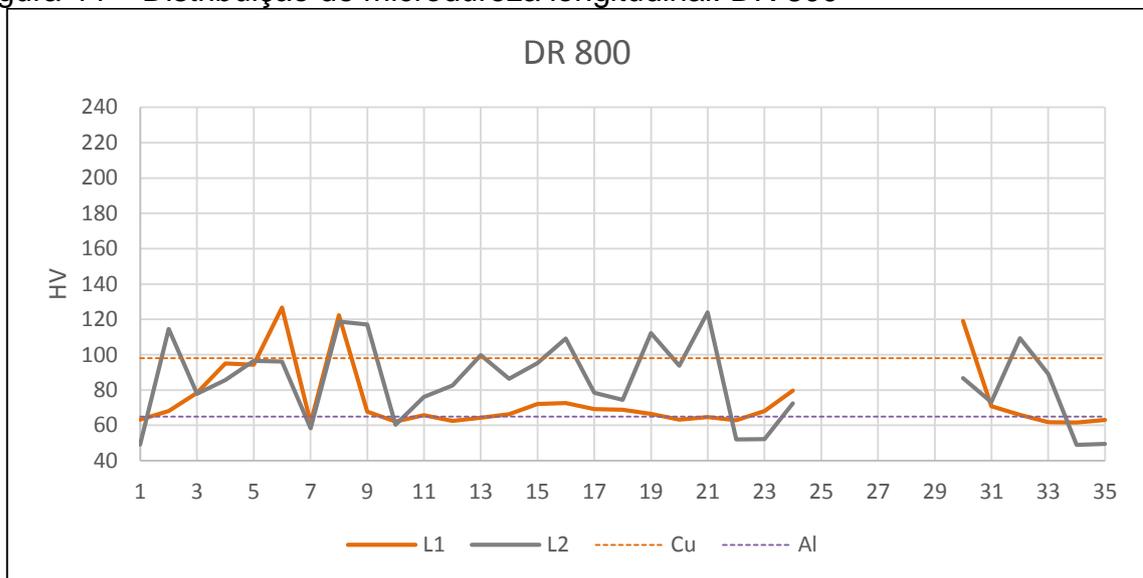
Atribui-se a menor quantidade de medições de dureza elevada em R2 ao fluxo de material que é diferente em função da ordem de avanço, ou seja, o recuo final é realizado posteriormente à translação geral da soldagem e em R1 o recuo é a primeira ação tomada, somente depois é efetuado o avanço geral.

Mesmo que o recuo final tenha apresentando menor quantidade de intermetálicos, esta zona ainda se manteve superior à região central da solda,

exceto para 800 rpm, o que reforça o conceito de que o aumento da rotação, mantendo os outros parâmetros constantes, ocasiona um maior aporte de energia, aumentando as diferenças entre as zonas centras e recuadas, visualizadas pela proporcionalidade entre o aumento das diferenças entre durezas com o aumento da rotação.

As Figuras 44, 45 e 46 ilustram as distribuições de dureza medidas longitudinalmente logo acima e abaixo da interseção das chapas, nas juntas soldadas pelo sistema DR em 800, 900 e 1000 rpm respectivamente.

Figura 44 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 800

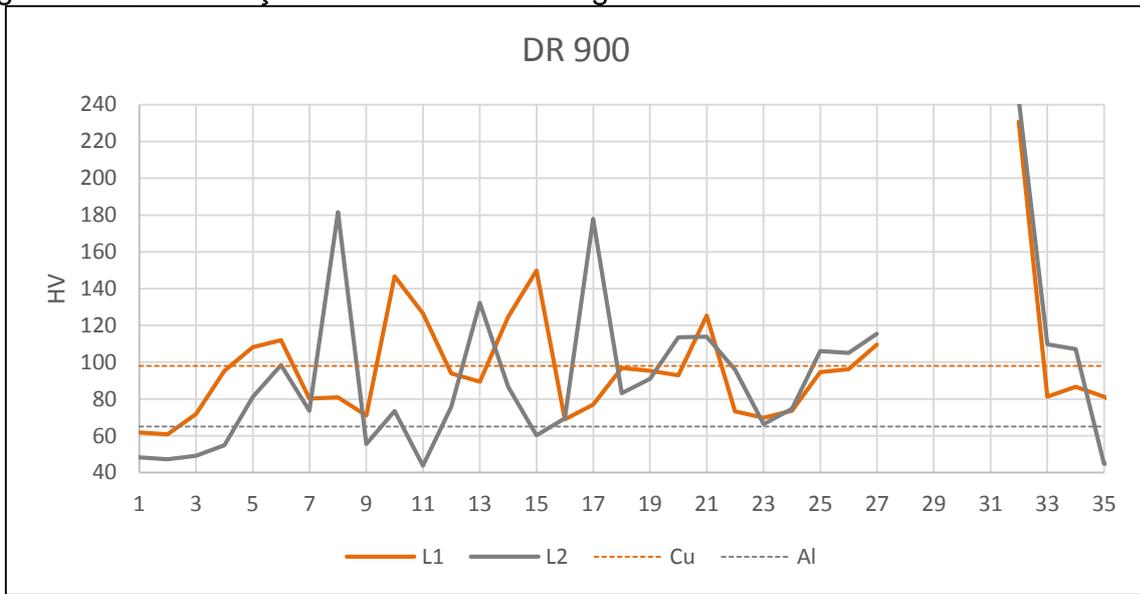


Fonte: Elaborado pelo autor

Os pontos sem a representação de valores correspondem ao vazio deixado pela ferramenta ao final da soldagem. Nota-se também, na Figura 44 que existe o cruzamento dos valores de dureza entre as curvas L1 e L2:

- L1 partindo da zona termicamente afetada do Cobre logo após o início da mistura apresenta dureza em média abaixo da de L2. Isso é um indicativo do baixo fluxo vertical dos materiais, supostamente resultado da geometria simples da ferramenta, inexistindo rosca no pino ou qualquer configuração que force esse movimento.
- L2 apresenta elevação da dureza ao longo de sua medição devido ao fato de ocorrer a penetração do Cobre sobre o Alumínio.

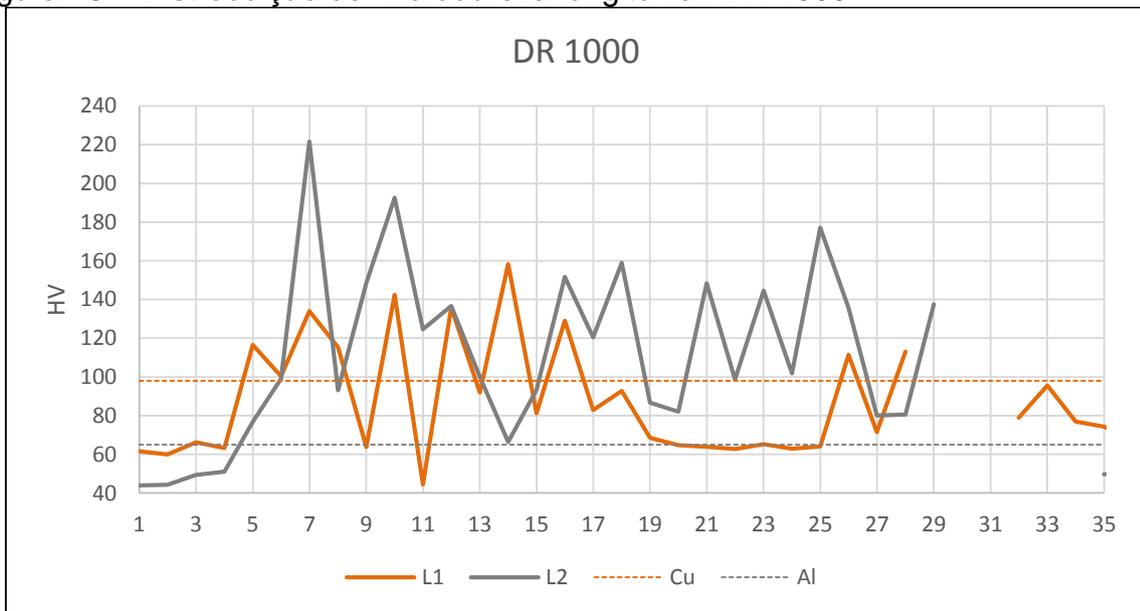
Figura 45 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 900



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o caso de DR 900 houve um aumento na dureza relativo ao parâmetro de 800 rpm, em especial aos pontos de medição 8 e 32, que apresentaram valores significativos de dureza.

Figura 46 – Distribuição de microdureza longitudinal: DR 1000



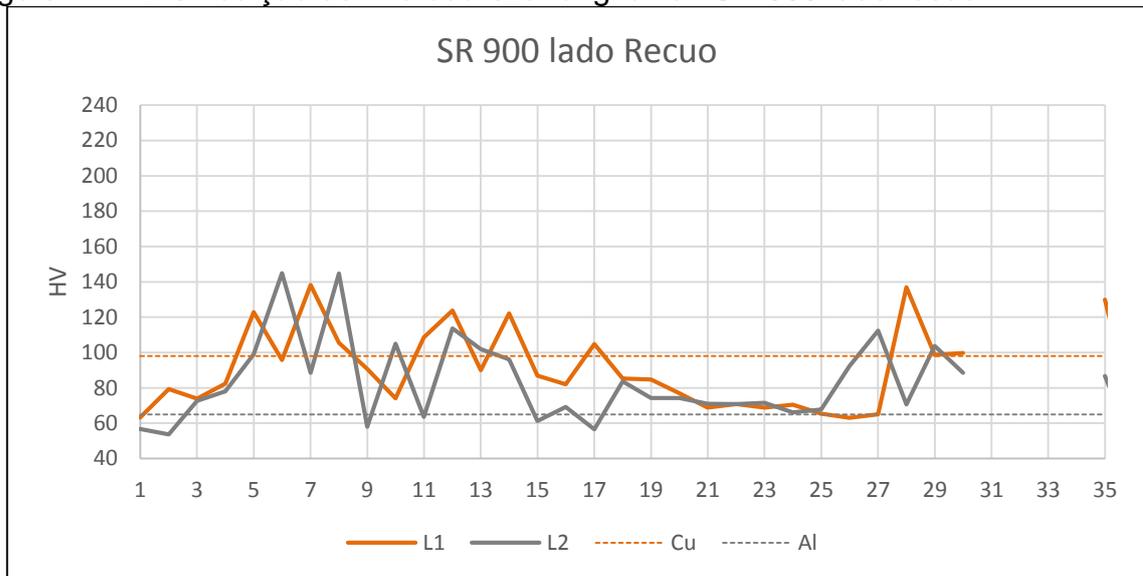
Fonte: Elaborado pelo autor

Em DR 1000 mediu-se vários picos de microdureza ao longo do cordão de solda, indicando precipitações intermetálicas ao longo de toda a zona de mistura,

porém percebe-se os dois maiores picos em 7 e 10, zona retrabalhada mecanicamente pelo recuo inicial.

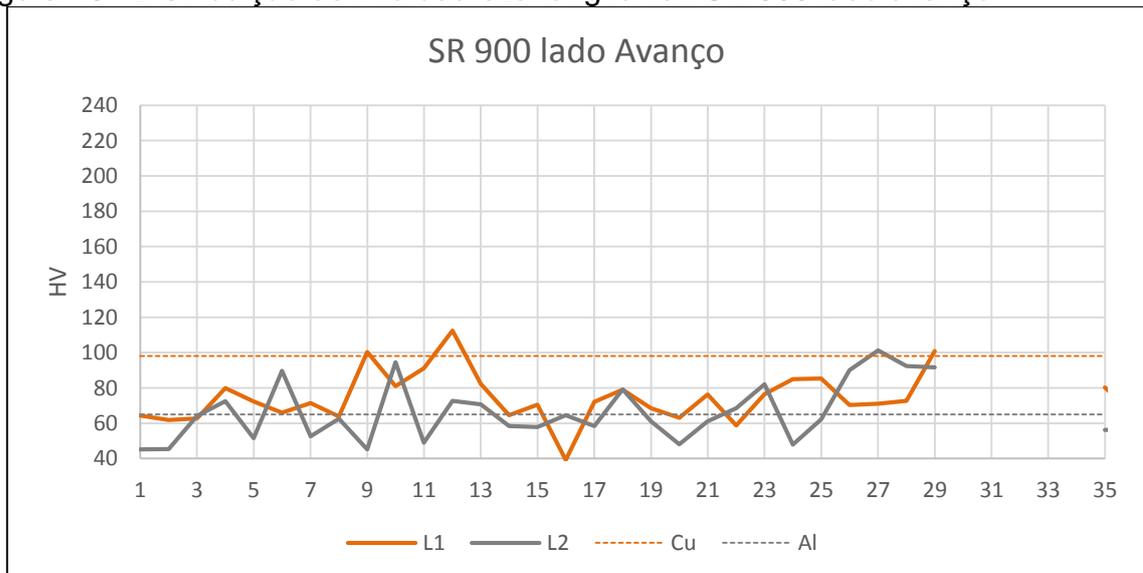
Como explicado anteriormente, pelo fato do sistema SR ter apresentado uma rotação ótima nos ensaios de cisalhamento, as medições de microdureza foram realizadas somente nos corpos de prova soldados com 900 rpm, e os resultados estão apresentados nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 – Distribuição de microdureza longitudinal: SR 900 lado recuo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48– Distribuição de microdureza longitudinal: SR 900 lado avanço



Fonte: Elaborado pelo autor

O lado de Avanço, visto na Figura 48 comparado ao lado de Recuo, na Figura 47 apresenta valores de microdureza mais baixos. Isto é um indicativo de que o fluxo de material resulta em uma assimetria entre os lados de avanço e recuo porque a temperatura é maior do lado de recuo ocasionando essa diferença de precipitados entre os dois lados.

Dos ensaios de microdureza é possível inferir que as áreas recuadas, devido ao retrabalho mecânico e conseqüentemente à maior temperatura, gera maior precipitação de intermetálicos, pois conforme visualizado nas Figuras 40, 41 e 42 as medições em R1 apontaram maior incidência de picos de dureza.

As macrografias longitudinais evidenciam a heterogeneidade da mistura entre os materiais dissimilares, ao realizar as medições traçando uma linha paralela à interface das chapas (L1 e L2), hora cai-se sobre um ponto de inserção do Cobre, hora sobre o metal base do Alumínio, hora sobre a zona misturada contendo os valores mais elevados. Por isso ocorre a flutuação de valores mostrada nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48.

As medições longitudinais indicaram que a presença de intermetálicos ocorre ao longo de toda a soldagem e os maiores valores estão nas medições iniciais e finais.

Possivelmente nas medições de microdureza, realizadas ao longo de C, não resultaram valores elevados devido ao baixo número de pontos medidos, distanciando-se demasiadamente um ponto do outro, ultrapassando-se a “pequena” zona de mistura.

Como nas medições de R1 e R2 utilizaram-se os mesmos números de pontos de medições e encontraram-se valores de dureza elevados na interface das chapas, conclui-se que o recuo ocasiona uma maior distribuição e aumento da “espessura” da zona que contém intermetálicos

Como a indentação do penetrador de diamante foi realizada com 300g, a região deformada resultou em um tamanho maior que as fases intermetálicas, ou seja, os valores de microdureza, por exemplo, de 200HV indicam a presença de IMCs inúmeras vezes mais duros.

Assim como Savolainen et al. (2005), que se encontrou em uma situação semelhante realizando o ensaio de microdureza com uma carga de 500g, “mascarando” a busca por IMCs, as fases possuem tamanho em mesma escala

micrométrica, portanto os valores medidos neste trabalho entre 140 e 240 HV correspondem a pontos com microfases distribuídas na zona de mistura.

Em função da indisponibilidade de tempo tornou-se inviável realizar todas as medições com menor carga de penetração. Mas para reforçar a suposição do tamanho da indentação, realizaram-se algumas medições com a carga de 25g nas áreas de recuo inicial no corpo de prova DR 900, encontrando-se durezas de 448,2 HV, 602 HV, 310,3 HV e 281,4 HV na região de mistura na interface das chapas.

## 5 CONCLUSÕES

A soldagem de materiais dissimilares através do processo utilizado neste trabalho, é tida como uma alternativa à união das ligas de Alumínio 6060 T5 e Cobre C110, pois como foi provado é possível soldar estes materiais de forma sustentável em comparação aos processos anteriormente utilizados, como por exemplo a soldagem por explosão.

Os parâmetros adotados para as soldagens *FSW* neste trabalho obtiveram sucesso nas mesmas, indicando semelhança com os parâmetros de Akbari, Abdi e Dadvand (2012), que realizaram as soldagens a 0,0179mm/rot.

Os objetivos propostos foram amplamente atendidos e com base na questão da pesquisa, se em comparação ao sistema convencional, o sistema com duplo recuo apresenta melhor comportamento mecânico, pode-se concluir que com base na propriedade de resistência mecânica ao ensaio monotônico de cisalhamento o sistema convencional apresenta maior confiabilidade e resistência mecânica média, especialmente usando 900 rpm no parâmetro de rotação.

Os modos de falha de rompimento diferentes no sistema DR elevaram à incerteza desta configuração de translação da ferramenta, fato este atribuído à presença de descontinuidades nas áreas de recuo.

Os pinos deixados mais ao centro do cordão somados ao fato das zonas recuadas terem gerado vazios em macro escala, diminuíram a resistência da união, ficando apenas a zona central soldada resistindo ao esforço do ensaio de cisalhamento.

A investigação das zonas de soldagem recuadas através de macrografia apontou a existência de vazios em todos os corpos de prova, de menor tamanho nas rotações inferiores (800 rpm e 900 rpm), esse fato é atribuído ao ângulo negativo da ferramenta durante o recuo e à ausência de pressão do ombro.

Como solução aos vazios deixados nos recuos sugere-se, com o ferramental atual, variar a penetração da ferramenta de forma a diminuir o efeito da ausência de material na segunda passagem translacional e desta forma aumentar a força de forjamento, removendo totalmente os vazios entre os materiais.

As medições de microdureza nas zonas da soldagem indicam supostamente o aumento de intermetálicos nas zonas de mistura recuadas em relação às zonas centrais dos cordões de solda, os valores de elevada dureza correspondem à

presença de precipitados, medidos posteriormente com carga de 25g, onde encontraram-se valores acima de 400HV.

O retrabalho mecânico do recuo pode vir a ser uma alternativa ao aumento da resistência mecânica da união se logicamente não deixar vazios na solda, como ocorreu nos parâmetros adotados neste trabalho, uma vez que Tan et al. (2013) já haviam salientado que IMCs bem distribuídos na zona soldada elevam a resistência da união.

Tem-se que o recuo inicial analisado qualitativamente, segundo a Figura 35, gera maior adesão na extremidade da solda, pois, como é visto, a superfície apresenta aspecto liso no botão de solda do sistema SR e a superfície irregular da fratura em DR indicam que a última possui maior resistência.

Por fim visando as necessidades em aplicações práticas de engenharia no ramo da transmissão de energia, setor que carece de soluções viáveis ao problema de corrosão galvânica em junções de cabos de Alumínio e Cobre, prova-se que é possível implementar uma soldagem por fricção e mistura adaptando-se um centro de usinagem CNC através de dispositivos de fixação e ferramenta com perfil simples.

### **5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros**

A pesquisa realizada neste trabalho é tida como um *start-up* para investigações mais profundas. Com base nos questionamentos e dificuldades que surgiram no desenvolvimento deste trabalho de conclusão, sugere-se a execução dos seguintes trabalhos futuros:

1. Diminuição do cordão de solda, ou aumento das dimensões da chapa de Alumínio para a atual geometria do cordão. Pois para este trabalho a mesma se mostrou superdimensionada, dificultando a análise dos recuos devido à aleatoriedade nos modos de falha. Outro motivo é a necessidade de utilizar a EMIC de 200kN para a junta soldada neste trabalho, diminuindo a resistência mecânica da junta abaixo de 5kN é possível ensaiar sob cisalhamento os corpos de prova na SHIMATZU disponível em Alegrete.

2. Executar os recuos modificando-se os ângulos de inclinação da ferramenta e profundidade de penetração, visando a eliminação dos vazios deixados nas zonas recuadas.
3. Projetar uma ferramenta com tamanho de ombro maior e com ângulo de inclinação que dificulte a expulsão do material da zona de mistura eliminando o excesso de rebarba.
4. Realizar ensaios metalográficos com os ataques químicos para possibilitar a observação das zonas (ZTA, ZTMA, *nugget*, etc).
5. Verificar através de novas amostras e ensaios as diferenças de tenacidade entre os dois sistemas (SR e DR), especialmente para a rotação de 1100 rpm.
6. Localizar e identificar, através da microscopia eletrônica de varredura e seus ensaios complementares, os compostos intermetálicos citados neste trabalho como os causadores dos resultados de elevada dureza.

## REFERÊNCIAS

ABDOLLAH-ZADEH, A.; SAEID, T.; SAZGARI, B. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints. **Jornal of Alloys and Compounds**, 460, p. 535-538, 2008.

AHMADI, H.; MOSTAFA ARAB, N.B.; GHASEMI, A. Optimization of process parameters for friction stir lap welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composites by Taguchi method. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 28(1), p. 279-284, 2014.

AKBARI, M.; BEHNAGH, R. A.; DADVAND, A. Effect of Materials Position on Friction Stir Lap Welding of Al to Cu. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.17, n.7, p.581-588, 2012.

ALCAN. **Manual de Soldagem**. 1ª Ed. São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, 1993. 141p.

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/catálogo\\_ligas\\_temperas\\_2010.pdf](https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catálogo_ligas_temperas_2010.pdf)>. Acesso em 25 de julho de 2014.

ANDRADE, M. M. de. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico: Elaboração de Trabalhos na Graduação**. 10 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 209:2010** – Alumínio e suas ligas – Composição química. Rio de Janeiro, 2010.

BAREKATAIN, H.; KAZEMINEZHAD, M.; KOHABI, A.H. Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Butt Friction Stir Welding of Severely Plastic Deformed Aluminum AA 1050 and Commercially Pure Copper Sheets. **Journal of Materials Science and Engineering**, 01, 2013.

BISADI, H. et al. The Influences of Rotational and Welding Speeds on Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al5083 and Commercially Pure Copper Sheets Lap Joints. **Materials and Design** 43, p.80-88, 2013.

BUFFA, G. et al. Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model. **Materials Science and Engineering A**, 419, p. 381-388, 2006.

CAPELARI, T.V. **Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052**. 2006. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

CAVALIERE, P.; SQUILLACE, A.; High Temperature Deformation of Friction Stir Processed 7075 Aluminium Alloy. **Materials Characterization**, 55. p. 136-142, 2005.

CERVEIRA, R.L.L.P. **Caracterização Experimental do Comportamento Mecânico Sob Solicitação Multiaxial em junções de Chapas AA2024-T3 Soldadas por Fricção-Mistura (“FSW”)**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

COLE, G. et al. **Steel World 2**, p. 75-83, 1997.

COLEGROVE, P.A.; SHERCLIFF, H.R.; ZETLER.R. Model for Predicting Heat Generation and Temperature in Friction Stir Welding From the Material Properties. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.12, n.4, p.284-297, 2007.

COPPERMETAL. **Informações Técnicas: Cobre Eletrolítico**. 2009, 3p. Banco de dados disponível em: < [http://www.coppermetal.com.br/pdf/cobre/info-tec-copp\\_cobre\\_eletrolitico.pdf](http://www.coppermetal.com.br/pdf/cobre/info-tec-copp_cobre_eletrolitico.pdf)>. Acesso em 25 de julho de 2014.

ELREFAEY, A.; TAKAHASHI, M.; IKEUCHI, K. Preliminary Investigation of Friction Stir Welding Aluminium/Copper Lap Joints. **Welding in the World**, v. 49, n. 3/4, p. 93-101, 2005.

ESAB – ESAB Welding & Cutting Products AB. **Products**. Sweden. Disponível em:<<http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?fuseaction=home.category&categoryId=7>>. Acesso em 28 jul. 2014.

FIARAVANTI, A.S. **Soldagem por FSW de Ligas de Alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6**. 2008. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

FIROUZDOR, V.; KOU, S. Al-to-Cu Friction Stir Lap Welding. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v.43A, p. 303-315, jan, 2012.

GALVÃO, I. et al. Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper. **Jornal of Materials Processing Technology**, v. 213, p. 1920-1928, 2013.

GIBSON, B. T. et al. Friction Stir Welding: Process, Automation and Control. **Journal of Manufacturing Process**. 16. p.56-73, 2014.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2009.

HILLER, D.J. **Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) da Liga de Alumínio 5052**. 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

INFOMET. **Hanbook: Metais e Ligas**. 200-?. Banco de Dados disponível em: <[http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=12](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod_tema=10&cod_secao=12)>. Acesso em 25 de julho de 2014.

KAHL, S.; OSIKOWICZ, W. Composite Aluminum-Copper Sheet Material by Friction Stir Welding and Cold Rolling. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 22(8), p. 2176-2184, Agosto, 2013.

KIMAPONG, K.; WATANABE, T. Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel. **Materials Transactions**. v.46, n. 10, p. 2211-2217, 2005a.

KIMAPONG, K; WATANABE, T. Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding. **Materials Transactions**, v. 46, n. 4, p. 835-841, 2005b.

LOHWASSER, D.; CHEN, Z. Friction Stir Welding: From Basics to Applications. **Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC**, p.13, 2010.

MILLER, W.S. et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. **Materials Science and Engineering**, A280, p. 37-49, 2000.

MISHRA, R.S., MA, Z.Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, v. 50, p. 1-78, 2005.

MUBIAYI, P. M.; AKINLABI, E. T. Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Copper – An Overview. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, v. III, Londres, Julho 3-5, 2013.

OLIVEIRA NETO, A. A. de. **Metodologia da Pesquisa Científica Guia Prática para Apresentação de Trabalhos Acadêmicos**. 3 ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

OOSTERKAMP, A. et al. Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. **Welding Journal, Welding Research – Supplement to the Welding Journal**, p.7, August 2004.

PAIVA, F. G. A.; **Caracterização de Junta Soldada por Atrito Linear com Mistura (FSW) da Liga Al-Mg-Si AA 6063**. 2009.109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2009.

SAEID, T.; ABDOLLAH-ZADEH, A.; SAZGARI, B. Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum-Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding. **Journal of Alloys and Compounds**, 490, p.652-655, 2010.

SANTOS, J.F. et al. Metallurgy and weld performance in friction stir welding. In: LOHWASSER, D.; CHEN, Z. Friction Stir Welding: **From Basics to Applications**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, p.317-319, 2010.

SAVOLAINEN K.; et al. A preliminar Study on Friction Stir Welding of Dissimilar Metal Joints of Copper and Aluminium. **6<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Helsinki University Of Technology**, P.O. Box 4200, 02015 TKK, 2005.

SORENSEN, V.D.; NELSON, T.W. Friction Stir Welding of Ferrous and Nickel. In: MISHRA, R.S. **Friction Stir Welding and Processing**. ASM International, p. 111, 2007.

SOUZA, G. S. **Influência da Geometria da Ferramenta na Soldagem da Liga de Alumínio 5052 pelo Processo Friction Stir Welding**. 2010. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TAN, C. W. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu 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, Georgia, USA, 2002. Disponível em: <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-developments-april-2002/>>. Acesso em 29 de junho de 2014.

THREADGILL, P.L.;NUNN, M.E. A Review of Friction Stir Welding: Part 1, Process Review. England: **TWI Rep.** n. 761, 2003.

TOLEPHIH, M.H. et al. Effect of Tool Offset and Tilt Angle on Weld Strength of Butt Joint Friction Stir Welded specimens of AA2024 aluminum allow welded to commercial pure copper. **Chemistry and Materials Research.** v.3, n.4, p.49-59, 2013.

XUE, P. et al. Achieving High Property Friction Stir Welded Aluminium/Copper Lap Joint at Low Heat Input. **Science and Technology and Joining**, v. 16, n. 8, p. 657-661, 2011.

ZAPPIA, T. Inspection and Quality Control In Friction Stir Welding. In: LOHWASSER, D.; CHEN, Z. Friction Stir Welding: **From Basics to Applications.** Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, p.13, 2010

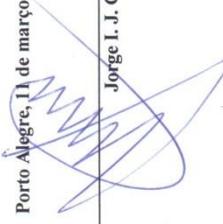
ZETTLER, R. Material Deformation and Joint Formation in Friction Stir Welding. In: LOHWASSER, D.; CHEN, Z. Friction Stir Welding: **From Basics to Applications.** Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, p.55, 2010.



## ANEXO B – CERTIFICADO DO ALUMÍNIO 6060 T5

A Figura 51 é uma copia escaneada do certificado de especificação técnica da matéria prima ASTM 6060 Liga 6060 T5. Adquirida para fins de pesquisa.

Figura 50 – Certificado do Alumínio 6060 T5

<b> Irmãos Galeazi Ltda.</b>																																																									
<b>IRMÃOS GALEAZI LTDA</b> Rua João Brufatto, 45 - Bairro Navegantes - Cep: 90.240-380 - Porto Alegre / RS Telefone: (51) 2104-1066 - Fax: (51) 2104-1080 Site: <a href="http://www.galeazi.com.br">www.galeazi.com.br</a> - E-mail: <a href="mailto:galeazi@galeazi.com.br">galeazi@galeazi.com.br</a>																																																									
<b><u>ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA</u></b>																																																									
<b>Informamos que os materiais constantes em nossa nota fiscal abaixo mencionada, obedecem conforme nosso fornecedor, as seguintes normas técnicas de fabricação:</b>																																																									
Especificação nº: 37225 Cliente: Fundação Luiz Englert Norma Correspondente: ASTM 6060 LIGA 6060 T5	Nota Fiscal nº: 59230 Data de Emissão: 11/03/2013 Material: BARRA ALUMÍNIO RETANG 19,05 X 3,18 MM																																																								
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Limites de Resist.(MPa)</td> <td>Alongamento (%)</td> <td>Dureza Brinell (HB)</td> <td>Conduct. Elétrica (%)</td> </tr> <tr> <td>Mín. 150</td> <td>Mín. 8</td> <td>Mín. 66</td> <td>Mín. -</td> </tr> <tr> <td>Máx. -</td> <td>Máx. -</td> <td>Máx. -</td> <td>Máx. -</td> </tr> </table>	Limites de Resist.(MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Conduct. Elétrica (%)	Mín. 150	Mín. 8	Mín. 66	Mín. -	Máx. -	Máx. -	Máx. -	Máx. -																																													
Limites de Resist.(MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Conduct. Elétrica (%)																																																						
Mín. 150	Mín. 8	Mín. 66	Mín. -																																																						
Máx. -	Máx. -	Máx. -	Máx. -																																																						
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Cu</td> <td>Fe</td> <td>Mg</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Si</td> <td>Ti</td> <td>Zn</td> <td>B</td> <td>Be</td> <td>Cr</td> <td>Bi</td> <td>Pb</td> <td>Ga</td> <td>V</td> <td>Na</td> <td>Zr</td> <td>Outros</td> </tr> <tr> <td>Mín. -</td> <td>0,10</td> <td>0,35</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,30</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Máx. 0,10</td> <td>0,30</td> <td>0,60</td> <td>0,10</td> <td>-</td> <td>0,60</td> <td>0,10</td> <td>0,10</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,050</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0,150</td> </tr> </table>	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros	Mín. -	0,10	0,35	-	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Máx. 0,10	0,30	0,60	0,10	-	0,60	0,10	0,10	-	-	0,050	-	-	-	-	-	-	-	0,150	
Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros																																								
Mín. -	0,10	0,35	-	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																																							
Máx. 0,10	0,30	0,60	0,10	-	0,60	0,10	0,10	-	-	0,050	-	-	-	-	-	-	-	0,150																																							
Porto Alegre, 11 de março de 2013.  Jorge I. J. Carvalho																																																									