

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATEUS TRELLES

**AVALIAÇÃO DA UNIÃO PRODUZIDA PELO MÉTODO DE
SOLDAGEM A FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA EM UMA JUNTA
TOPO DE LIGA AA6060-T5**

Alegrete

2017

MATEUS TRELLES

**AVALIAÇÃO DA UNIÃO PRODUZIDA PELO MÉTODO DE
SOLDAGEM A FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA EM UMA JUNTA
TOPO DE LIGA AA6060-T5**

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

Orientador: Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

Alegrete

2017

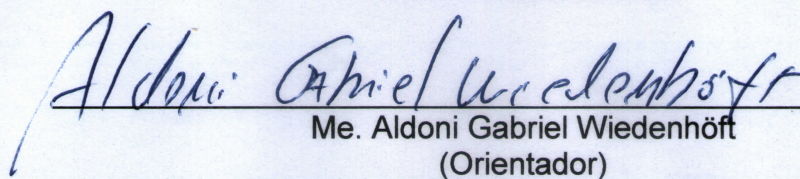
MATEUS TRELLES

**AVALIAÇÃO DA UNIÃO PRODUZIDA PELO MÉTODO DE
SOLDAGEM A FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA EM UMA JUNTA
TOPO DE LIGA AA6060-T5**

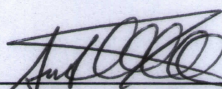
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção
do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de Julho de
2017.

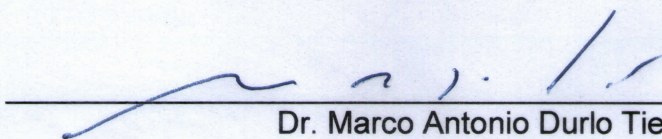
Banca examinadora:



Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft
(Orientador)
UNIPAMPA



Dra. Ana Claudia Costa de Oliveira
UNIPAMPA



Dr. Marco Antonio Durlo Tier
UNIPAMPA

Dedico este trabalho ao meu pais, Dion e Hedi, pelo carinho, compreensão e esforço. Sem a garra de vocês, eu nunca teria chegado até aqui; à minha irmã Mônica, que sempre me apoiou e mostrou o lado bom da coisas; ao vô Claudio que não pode acompanhar este momento, mas sempre será lembrado em meu coração; aos demais familiares, que sempre motivaram-me com a bela pergunta: "Quando tu se forma Mateus?"

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a pessoa mais importante na realização desse trabalho, eu mesmo, sem mim nada disso existiria.

Aos meus pais que sempre lutaram com unhas e dentes para que pudesse ter um futuro melhor.

A Universidade Federal do Pampa, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram o futuro que hoje vislumbro.

Ao meu orientador, Professor Aldoni Wiedenhof, pela orientação, apoio e empenho dedicado á elaboração deste trabalho.

Meus agradecimentos especiais aos amigos que fizeram parte dessa caminhada, Bell, Horta, Zé, Pri e Patan, companheiros nos bons e maus momentos.

Obrigado aos amigos e parentes que moram longe, que na minha ausência dedicada ao estudo, sempre entenderam que o futuro é feito a partir da dedicação no presente.

*"O mundo seria melhor
se não houvesse tanta gente
prometendo melhorá-lo."*

Olavo de Carvalho

RESUMO

A baixa soldabilidade de certos materiais, fez surgir na década de 1990 o processo denominado *friction stir welding* (soldagem por fricção em mistura mecânica). Ele é capaz de realizar a união em estado sólido, por meio de uma ferramenta de geometria especial, que em contato com os componentes promove a intensiva mistura do material e o mecanismo de adesão das superfícies. Os parâmetros do processo tem relação direta com as dimensões e composições dos materiais a serem unidos, e devido a isso, muitos são os estudos realizados para a determinação dos parâmetros ideais. Nesse contexto, o trabalho tem por objetivo executar o processo em liga de alumínio 6060-T5 de 4,75 mm de espessura na configuração de junta topo, através da adaptação em um centro de usinagem vertical disponibilizado pela Universidade Federal do Pampa. As soldagens foram executadas nas velocidades de avanço de 30 mm/min e 50 mm/min em três velocidades de rotação distintas, 1000, 1500 e 2000 rpm. Os resultados obtidos por meio de inspeção visual, análise da macrográfica, ensaios de microdureza e tração mostraram que a combinação de 50 mm/min e 1500 rpm apresentou os resultados mais confiáveis. A velocidade de rotação de 2000 rpm, não contribuiu para aumento de resistência mecânica e produziu cavidades na região soldada para os dois níveis de velocidade de avanço. Devido ao maior aporte de calor as soldagens com velocidade de avanço inferior apresentaram menor resistência. Mesmo assim, a janela de parâmetros adotada nesse trabalho pode ser considerada boa, pois a eficiência de junta obtida foi sempre superior a 80%.

Palavras-chave: Aporte térmico. Velocidade de avanço e rotação. Eficiência da junta.

ABSTRACT

The low weldability of certain materials gave rise to the so-called friction stir welding process in the 1990s. It is able to perform the solid state bonding by means of a special geometry tool that in contact with the components promotes the intensive mixing of the material and the adhesion mechanism of the surfaces. The parameters of the process are directly related to the dimensions and compositions of the materials to be joined, and due to this, many studies are carried out to determine the ideal parameters. In this context, the objective of this work is to carry out the process in a 6060-T5 aluminum alloy of 4.75 mm thickness in the top joint configuration, through the adaptation in a vertical machining center provided by the Federal University of Pampa. The welds were run at feed rates of 30 mm/min and 50 mm/min at three different speeds, 1000, 1500 and 2000 rpm. The results obtained through visual inspection, metallographic analysis, microhardness and tensile tests showed that the combination of 50 mm/min and 1500 rpm presented the most reliable results. The rotational speed of 2000 rpm did not contribute to increased mechanical strength and produced cavities in the welded region for the two levels of feed velocity. Due to the higher heat input the welds with lower feed speed presented less resistance. Even so, the parameter window adopted in this work can be considered good, since the joint efficiency obtained was always higher than 80%.

Key-words: Heat generation. Speed welding and rotation. Efficiency of the joint

Lista de ilustrações

Figura 1 – Processo FSW	29
Figura 2 – Esquema da macrografia de uma solda pelo processo FSW	31
Figura 3 – Macrografia de liga AA5052 soldada pelo processo FSW	31
Figura 4 – Micrografia de liga de alumínio 6063	32
Figura 5 – Caracterização dos processos metalúrgicos envolvidos	33
Figura 6 – Assimetria entre os lados da solda	34
Figura 7 – Geometrias comuns para a base do ombro	35
Figura 8 – Geometrias complexas da base do ombro	35
Figura 9 – Geometrias do pino da ferramenta	36
Figura 10 – Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas	39
Figura 11 – Redução na descontinuidade com ajuste do ângulo de inclinação da ferramenta	40
Figura 12 – Defeito de raiz	41
Figura 13 – <i>Kissing bond</i>	41
Figura 14 – Equipamentos exclusivos para a realização do processo FSW	42
Figura 15 – Avanço em mm/rev utilizados em diversos trabalhos	44
Figura 16 – Dispositivo de fixação das chapas	47
Figura 17 – Centro de usinagem CNC ROMI D 800	48
Figura 18 – Geometria utilizada na ferramenta	48
Figura 19 – Posição da ferramenta sobre a linha de junta	50
Figura 20 – Deslocamento da ferramenta nas soldagens	50
Figura 21 – Corpo de prova com dois cordões de solda distintos	51
Figura 22 – Retirada dos corpos de prova de tração	53
Figura 23 – Dimensões dos corpos de provas do ensaio de tração	53
Figura 24 – Esquema de medições na seção transversal da solda	54
Figura 25 – Seção longitudinal para medição de microdureza	55
Figura 26 – Teste de normalidade de Anderson-Darling	59
Figura 27 – Carga média dos corpos de prova	61
Figura 28 – Carga média em função da velocidade de avanço	61
Figura 29 – Carga média em função da velocidade rotação	62

Figura 30 – Tipos de falhas apresentadas nos ensaios de tração	63
Figura 31 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 1000 rpm	64
Figura 32 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 1500 rpm	65
Figura 33 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 2000 rpm	65
Figura 34 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 1000 rpm	66
Figura 35 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 1500 rpm	67
Figura 36 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 2000 rpm	68
Figura 37 – Microdureza média na zona de mistura	68
Figura 38 – Perfil de microdureza transversal de maior extensão	69
Figura 39 – Microdureza longitudinal na região de entrada da ferramenta	70
Figura 40 – Microdureza longitudinal na região de saída da ferramenta	70
Figura 41 – Macrografia de amostra soldada a 1000 rpm e 30 mm/min	71
Figura 42 – Macrografia de amostra soldada a 1500 rpm e 30 mm/min	71
Figura 43 – Macrografia de amostra soldada a 2000 rpm e 30 mm/min	72
Figura 44 – Macrografia de amostra soldada a 1000 rpm e 50 mm/min	72
Figura 45 – Macrografia de amostra soldada a 1500 rpm e 50 mm/min	72
Figura 46 – Macrografia de amostra soldada a 2000 rpm e 50 mm/min	73
Figura 47 – Análise de variância fator único	88
Figura 48 – Análise de variância fator duplo para a carga máxima	88
Figura 49 – Certificado do Alumínio	91

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades do alumínio	23
Tabela 2 – Classificação das ligas de alumínio	24
Tabela 3 – Soldabilidade das ligas de alumínio mais comuns	28
Tabela 4 – Composição química da liga AA6060	46
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga AA6060-T5	46
Tabela 6 – Tratamentos utilizados nas soldagens	51
Tabela 7 – Cordões obtidos com velocidade de avanço de 30 mm/min	57
Tabela 8 – Cordões obtidos com velocidade de avanço de 50 mm/min	58
Tabela 9 – Resumo da tabela ANOVA fator único para carga máxima	59
Tabela 10 – Tabela ANOVA fator duplo para a variável resposta carga máxima	60
Tabela 11 – Eficiência da união	62
Tabela 12 – Procedimento das têmperas de alumínio	83
Tabela 13 – Parâmetros de soldagem na configuração topo em alumínio	85
Tabela 14 – Dimensões das ferramentas na soldagem topo em alumínio	86
Tabela 15 – Código atribuído a combinação de parâmetros	87
Tabela 16 – Disposição dos dados para calculo da anova fator único	87

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Alumínio e suas ligas	23
2.1.1	Tratamentos termomecânicos	26
2.1.2	Soldagem do alumínio	27
2.2	O processo friction stir welding	28
2.2.1	Zonas de solda	30
2.2.2	Assimetria do processo e fluxo de material	32
2.2.3	Parâmetros do processo	34
2.2.3.1	Geometria da ferramenta	34
2.2.3.2	Velocidade angular e de avanço na ferramenta	37
2.2.3.3	Ângulo de inclinação e penetração da ferramenta	38
2.2.4	Defeitos na solda	39
2.2.5	Equipamentos	41
2.3	Unões de ligas alumínio	43
3	METODOLOGIA	45
3.1	Delineamento da pesquisa	45
3.1.1	Seleção dos materiais e equipamentos	45
3.1.1.1	Material base	46
3.1.1.2	Dispositivo de fixação das chapas	46
3.1.1.3	Equipamento para as soldagens	47
3.1.1.4	Desenvolvimento da ferramenta	48
3.1.2	Delineamento dos experimentos	49
3.1.2.1	Posicionamento da ferramenta	49
3.1.2.2	Deslocamento da ferramenta	50
3.1.2.3	Matriz de variáveis	51
3.2	Forma de coleta de dados	52

3.2.1	Inspeção visual	52
3.2.2	Ensaio de tração	52
3.2.3	Medições de microdureza	53
3.2.4	Macrografias	54
4	RESULTADOS	57
4.1	Aparência da união	57
4.2	Ensaio de tração	58
4.3	Perfis de microdureza	63
4.4	Macrografia da seção transversal	71
4.5	Discussão dos resultados	73
5	CONCLUSÕES	75
5.1	Trabalhos futuros	76
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICES	81
	APÊNDICE A – TÊMPERAS EM ALUMÍNIO	83
	APÊNDICE B – PARÂMETROS UTILIZADOS NAS REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA	87
	ANEXOS	89
	ANEXO A – CERTIFICADO DO MATERIAL	91

1 INTRODUÇÃO

É notória a exigência do mercado atual por materiais de baixo peso e elevada resistência mecânica. Os setores da indústria que mais avançam na substituição das ligas ferrosas por materiais de baixa densidade são o automotivo e aeronáutico principalmente. Nesse contexto as ligas de alumínio, níquel e magnésio destacam-se.

A pressão sobre os legisladores é sempre maior no sentido de regulamentar e restringir as emissões de poluentes. Para tal, reduzir o peso dos automóveis buscando melhorar sua eficiência é uma realidade que favorece a inserção das ligas de alumínio no mercado automotivo. Contudo, a crescente demanda pela utilização das ligas de alumínio esbarram em algumas restrições no que refere-se a soldagem, como o elevado ponto de fusão (2050°C) da camada de óxido, cerca de 6% de contração volumétrica na solidificação e a elevada solubilidade de hidrogênio e outros gases quando está em estado líquido (PRAVEEN; YARLAGADDA, 2005). Superadas essas características do material, ainda há a redução da resistência mecânica nas ligas tratáveis termicamente, causada pela fusão do material nos processos tradicionais de soldagem.

Desde sua criação, o processo *friction stir welding* mostra-se atrativo para a união das ligas de alumínio. Sendo uma técnica realizada em estado sólido, não apresenta problemas que ocorrem durante a solidificação do material. Em muitos casos é possível obter propriedades mecânicas e microestruturais muito superiores se comparadas aos processos convencionais (MISHRA; MA, 2005).

A técnica *friction stir welding* possui elevado número de variáveis envolvidas e isso revela a sua complexidade. Cada material possui um intervalo de parâmetros adequados para a realização do processo, no entanto esses parâmetros diferem-se de acordo com a espessura do material, além da geometria da ferramenta que possui um projeto específico em função da espessura e propriedades do material a ser soldado.

Apesar do número de trabalhos brasileiros sobre o tema ter aumentado nos últimos anos, o tema ainda encontra-se em processo de amadurecimento nas universidades brasileiras. Uma das razões para tal, é a necessidade de adaptação do processo as máquinas disponíveis. Visto que o alto investimento para aquisição de

equipamentos dedicados a técnica é inviável para a maioria das instituições públicas.

A respeito da liga selecionada para a realização do processo, foi levada em consideração a disponibilidade no mercado, a utilização nacional e a número de estudos envolvendo à mesma, dessa maneira optou-se pela liga 6060-T5, pertencente a família de ligas de alumínio tratáveis termicamente, para a realização desta pesquisa sem fins comerciais.

Desta forma, este trabalho justifica-se devido a necessidade de avaliar a influência dos parâmetros velocidade de rotação e de avanço da ferramenta no processo de soldagem por fricção e mistura mecânica adaptado para a realização em um centro de usinagem.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a obtenção de juntas soldadas da liga de alumínio AA6060-T5 por meio de aproximação experimental ao processo *friction stir welding* em um centro de usinagem. Como objetivos específicos as avaliações qualitativas e quantitativas das soldas produzidas, por meio de análise macrográficas, de microdurezas e ensaios de tração.

Para realização da proposta mencionada, os seguintes objetivos específicos deverão cumpridos:

- a) Realização de revisão na literatura a cerca dos mecanismos envolvidos no processo;
- b) Projeto e fabricação da geometria de ferramenta e dispositivo de fixação das chapas;
- c) Desenvolvimento de uma metodologia de experimentos para obtenção das juntas soldadas, utilizando o ferramental fabricado.

2 Revisão Bibliográfica

A seguir será realizada revisão dos principais conceitos a cerca do processo *friction stir welding*, dentre eles, a sua utilização em ligas de alumínio, as zonas características de solda, sua assimetria e o fluxo de material, os principais parâmetros envolvidos, os defeitos mais comuns e os equipamentos empregados no processo.

2.1 Alumínio e suas ligas

O Alumínio possui excelentes propriedades para a indústria, tais como, resistência a corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica além da boa conformabilidade. Algumas de suas ligas alcançam resistência mecânica superiores à aços de baixo carbono, com isso, tornam-se alternativas visando a redução de peso, aumento de carga útil e diminuição no consumo de combustíveis para o setor de transportes (DAVIS, 2009).

Na [Tabela 1](#) é mostrada uma relação das principais propriedades do Alumínio.

Tabela 1 – Propriedades do alumínio

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

Fonte: Adaptado de [Alcan \(1993\)](#)

De forma ampla, as ligas de alumínio são classificadas em duas categorias segundo seu processamento: ligas fundidas e ligas trabalhadas mecanicamente.

As ligas trabalhadas mecanicamente, foco do trabalho, seguem a nomenclatura proposta pela Aluminium Association e regulamentada pela norma NBR ISO 209:2010, na qual são classificadas por séries de quatro dígitos. Para a série 1xxx o primeiro dígito refere-se ao elemento de liga presente na liga. O segundo dígito informa se ocorreram modificações nos níveis de impurezas, se igual a zero, significa que as impurezas ali concentradas são provenientes do processo de fabricação, se diferente de zero, determina o controle especial na concentração destas impurezas. Já o terceiro

e quarto dígitos, o percentual de alumínio além dos 99% existentes. Uma liga de 1045 por exemplo, possui 99,45% de alumínio e o demais impurezas provenientes do processo (CAPELARI, 2006).

A Tabela 2 mostra a classificação das ligas de alumínio segundo Aluminium Association.

Tabela 2 – Classificação das ligas de alumínio

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

Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência serão descritas as principais características e aplicações para as ligas de Alumínio citadas na Tabela 2:

- Série 1xxx- É empregada para referenciar as ligas de alumínio com elevado grau de pureza (maior que 99%). Possui resistência à corrosão, elevada condutividade térmica, excelente ductibilidade e baixa resistência mecânica. Devido a essas características é utilizada frequentemente como condutores elétricos (CAPELARI, 2006).
- Série 2xxx- Designada para as ligas que possuem Cobre como principal elemento de adição, possuindo até 6% do elemento. Outros elementos podem ser adicionados em menor quantidade, magnésio para aumentar a resistência, níquel, titânio, vanádio e zircônio para manter as propriedades a elevada temperatura (CERVEIRA, 2008).

Devido a adição dos elementos mencionados respondem satisfatoriamente aos processos de endurecimento, por isso alcançam propriedades mecânicas semelhantes a aços baixo carbono. Possuem boa usinabilidade, porém baixa soldabilidade e resistência a corrosão (CAPELARI, 2006).

São utilizados em estruturas aeronáuticas, setor automotivo, munição e componentes forjados (SOKI, 2005).

- Série 3xxx- O principal elemento de liga é o manganês, o mesmo reduz a resistividade e aumenta a resistência mecânica segundo Soki (2005). De modo geral apresentam resistência mecânica 20% maior que as ligas 1xxx. São aplicadas onde há necessidade para elevada resistência à corrosão (CERVEIRA, 2008).
- Série 4xxx- O silício presente neste tipo de liga, em teores de até 12%, contribui para a diminuição do ponto de fusão deste tipo de liga e por conseguinte é muito utilizada para arames de solda e ligas de brasagem (CERVEIRA, 2008).
- Série 5xxx- O magnésio em adição ao manganês presentes nessa série conferem a elas média-alta resistência mecânica. Apresentando boa soldabilidade e destacando-se pela excelente resistência a corrosão em atmosfera salina. Com isso, é aplicada amplamente em componentes para embarcações e trabalhos criogênicos, vasos de pressão e até estruturas automotivas (CAPELARI, 2006; CERVEIRA, 2008).
- Série 6xxx- A presença de silicato de magnésio (Mg_2Si) na proporção necessária provê o aumento da resistência mecânica. Outros elementos como, manganês, cromo e zircônio são adicionados a liga para controlar o tamanho do grão e prevenir a recristalização durante tratamento térmico. As ligas desta série possuem resistência à corrosão, boa conformabilidade e soldabilidade e são de fácil usinagem. Com isso, são empregadas em chapas automobilísticas, tubulações, quadros de bicicletas e aplicações marítimas (CERVEIRA, 2008).
- Série 7xxx- O zinco (1 a 8% da composição) é seu principal elemento de liga e em adição ao cromo e manganês produzem a série de maior resistência mecânica dentre as ligas de Alumínio. Em contrapartida sua resistência a corrosão é diminuída. Costuma ser utilizada para estruturas aeronáuticas (SOKI, 2005).
- Série 8xxx- Essa série possui grande variedade de composições, destacam-se nelas as ligas com adição de lítio, que promovem redução de peso em estruturas aeronáuticas e espaciais. As mesmas se caracterizam pela resistência a fadiga, baixa massa específica e resistência a propagação de trincas (CERVEIRA, 2008).

Para identificação da sequência dos processos mecânicos e térmicos realizados nas ligas desde a sua produção, outro sistema de classificação é empregado.

2.1.1 Tratamentos termomecânicos

Nas ligas de alumínio, a atribuição têmpera é conferida a sequência de deformações a frio e a quente, por tratamentos térmicos ou a combinação de ambos realizados no processo de fabricação.

A nomenclatura utilizada para referenciar o processo de têmpera é separado por hífen da classificação por componentes de liga. Esta designação é realizada por meio de uma letra maiúscula seguida de dois ou três dígitos. Para [Davis \(2009\)](#) o significado da classificação é detalhado a seguir:

- F- Como fabricado. Ligas que passaram por deformação a frio, a quente ou fundidas onde nenhum controle foi realizado nas condições térmicas ou de endurecimento por deformação.
- O- Recozido. Ligas que passaram pelo processo de recozimento, para redução da resistência mecânica e aumento da ductibilidade e estabilidade dimensional.
- H- Endurecimento por deformação. Ligas que sofreram processo de encruamento para aumento de resistência mecânica, independente da realização de tratamento térmico posterior. Essa nomenclatura precede um ou dois dígitos para representar a ocorrência de alívio de tensões e o percentual mencionado.
- W- Tratamento térmico de solubilização. Esta classificação é aplicado as ligas que modificam sua resistência mecânica espontaneamente por precipitação à temperatura ambiente, durante um período de meses ou mesmo anos.
- T- Têmpera. Aplicado as ligas que apresentam estabilização da resistência mecânica após semanas do processo de solubilização. Consiste no resfriamento brusco após a etapa de solubilização, visando formação de soluções sólidas supersaturadas. A letra T é seguida por um ou dois dígitos, que descrevem a sequência de processos realizados.

Mais informações a respeito dos tipos de tratamentos térmicos para têmpera em alumínio, estão dispostos no [Apêndice A](#).

2.1.2 Soldagem do alumínio

Os processos utilizados para a soldagem do alumínio e suas ligas devem gerar juntas com resistência similar ao material base, bom aspecto visual, desempenho a fadiga e resistência a corrosão. Dentre os mais utilizados pode-se mencionar os que utilizam gás inerte de proteção, como *Tungsten Inert Gas* (TIG) e *Metal Inert Gas* (MIG) ([DAVIS, 2009](#)).

De suma importância para a utilização das ligas de alumínio na indústria, a soldagem deve ocorrer de maneira a não prejudicar as propriedades adquiridas anteriormente. Isso é significativamente importante quando as ligas de alumínio a unir, foram endurecidas por precipitação ou encruamento.

Processos de soldagem que envolvem a fusão do material tendem a remover parcial ou completamente os efeitos do endurecimento via trabalho mecânico. Na zona termicamente afetada (ZTA) a resistência mecânica será similar a uma liga recozida. Agora, em ligas endurecidas via precipitação, a resistência mecânica será levemente inferior ao material base ([CAPELARI, 2006](#)).

Dentre as principais características das ligas de alumínio que mais afetam o processo de soldagem, destacam-se:

- a) Formação de camada de óxido;
- b) Solubilização do hidrogênio;
- c) Características térmicas.

A grande afinidade química entre alumínio e o oxigênio promove a formação de uma camada de óxido (Al_2O_3) sobre o substrato. Esta serve como proteção natural à corrosão. O elevado ponto de fusão desta camada (2050°) associada a grande espessura da mesma pode dificultar a abertura de arco elétrico ou tornar a poça de fusão insuficiente ([ALMEIDA, 2013](#)).

Uma das principais causas de porosidade na soldagem de alumínio, se dá pela baixíssima solubilidade de hidrogênio em alumínio sólido. Devido a esse fator, bolhas

de gás são formadas pelo hidrogênio não solubilizado no momento da solidificação da poça de fusão. Este tipo de defeito reduz sensivelmente a resistência à fadiga e a tração da união (PRAVEEN; YARLAGADDA, 2005).

O alumínio possui elevada condutividade térmica e calor específico, portanto necessita de um maior aporte de calor em comparação aos metais ferrosos. Com isso, as ligas de alumínio ficam vulneráveis as variações no aporte de calor. Alterações na penetração da solda e mudanças na fusão são efeitos desse aporte irregular em processos velozes como MIG. O coeficiente de expansão duas vezes maior que dos aços combinado a contração na solidificação, podem ocasionar problemas dimensionais (ALMEIDA, 2013).

Segundo Olson (1993) a capacidade do material ser unido por determinado processo de soldagem, satisfazendo as condições de serviço almejadas em projeto é definida como soldabilidade. Considerando apenas os processos TIG e MIG, as ligas de alumínio podem ser classificadas quanto a soldabilidade conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Soldabilidade das ligas de alumínio mais comuns

Soldabilidade	Ligas
Prontamente soldáveis	1350, 1060, 1100, 2219, 3003, 3004, 5005, 5050, 5052, 5083, 5086, 5154, 5254, 5454, 5456, 5652, 6010, 6061, 6063, 6101, 6151, 7005, 7039
Soldáveis na maioria das aplicações	2014, 2036, 2038, 4032
Soldabilidade limitada	2024
Não recomendada	7021, 7029, 7050, 7075, 7079, 7129, 7150, 7178, 7475

Fonte: Olson (1993)

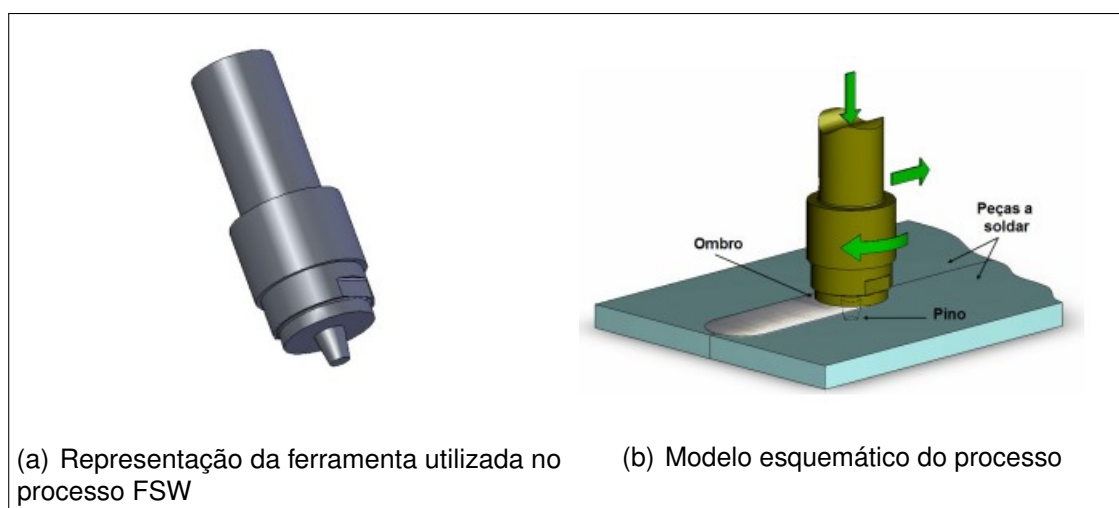
2.2 O processo friction stir welding

O processo convencional de soldagem que utiliza a fricção como meio de unir dois elementos é utilizado desde meados da década de 1950, quase que exclusivamente para a união de perfis com geometria concêntrica. Já em 1991 por meio do The Welding Institute (TWI) foi desenvolvida a tecnologia conhecida como *Friction Stir Welding* (FSW) (THOMAS et al., 1995).

O processo FSW se dá em estado sólido por meio de uma ferramenta de geometria especial com um pino na extremidade. A ferramenta em rotação pré-determinada pressiona as chapas e o atrito ferramenta-peça promove o aquecimento da junta. Desta forma há redução da resistência mecânica, que favorece o escoamento de material e os mecanismos de extrusão e forjamento responsáveis pela união das peças (FIORAVANTI, 2008; PAIVA, 2009).

A Figura 1(a) apresenta o esquema simplificado de uma ferramenta que pode ser utilizada no processo, e a Figura 1(b) ilustra como a ferramenta desloca-se sobre uma junta na configuração topo.

Figura 1 – Processo FSW



Fonte: Aptado de Capelari (2006)

O pino penetra a junta até que o ombro da ferramenta esteja em forte contato com a superfície das chapas, desta maneira o ombro aquece previamente as regiões a serem soldadas e atua de maneira a impedir que o material seja expurgado da união. Na sequência a ferramenta desloca-se ao longo da junta gerando intenso revolvimento do material nas proximidades do pino, essa mistura entre os materiais das chapas originará a solda (MISHRA; MA, 2005).

Para LI et al. (2012) há várias vantagens na utilização do processo FSW, como a baixa temperatura de operação, o fácil preparo das peças a serem soldadas, a não utilização de gases de proteção e a eliminação dos fumos de soldagem. Shen et al. (2015) afirma que a utilização de temperaturas menores dificulta a formação de componentes intermetálicos (CIMs) frágeis, evitando possíveis empenamentos e

tensões residuais elevadas que frequentemente originam trincas após o resfriamento. Ainda é possível mencionar a alta repetibilidade, alta produtividade, menor custo de produção em alguns casos e a possibilidade de utilização em materiais de baixa soldabilidade (DEFALCO, 2006).

Para que a união obtenha desempenho satisfatório há a necessidade de um sistema de fixação para as chapas, pois elevadas forças atuam no sentido de separá-las quando a ferramenta avança ao longo da junta. Esse fenômeno é minimizado na configuração de soldagem sobreposta (ALMEIDA, 2013).

Dentre as principais desvantagens do processo está a necessidade de excelente fixação como mencionado, presença de um furo no final da solda e a dificuldade em soldar materiais de elevado ponto de fusão (CAPELARI, 2006).

2.2.1 Zonas de solda

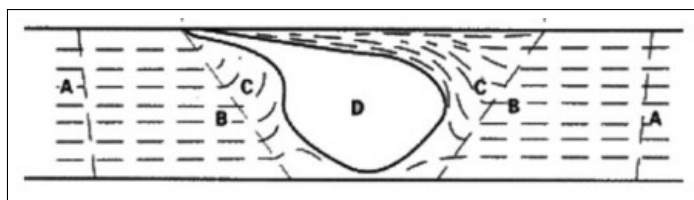
Quando trata-se da microestrutura de uma união realizada pelo método FSW, Threadgill (1999) foi um dos primeiros a propor modelos idealizados para soldagem em ligas de alumínio. Segundo o mesmo, é possível classificar as zonas de solda da seguinte maneira:

- Zona A- Distante da região de solda, equivale ao material base (MB) não afetado pelo processo;
- Zona B- Representa a zona termicamente afetada (ZTA). Essa região tem sua microestrutura e propriedades mecânicas afetadas apenas pelo fluxo de calor proveniente do processo. Nesta região normalmente há diminuição na dureza de ligas envelhecidas ou endurecidas à medida que se aproxima o centro da solda;
- Zona C- Denominada termo-mecanicamente afetada (ZTMA). Nessa região os efeitos térmicos são mais elevados, severos o suficiente para dissolver parte dos precipitados. Além disso, o material sofre intensiva deformação plástica, nessa região os grãos podem ser reorientados em até 90°. Embora alguns grãos equiaxiais sejam formados, a recristalização não é comumente obtida nessa zona. Nas regiões mais quentes há aumento de dureza desde que sejam ligas tratáveis termicamente;

- Zona D- Conhecida como *nugget* ou zona de mistura (ZM) é parte central da ZTMA. É a região mais afetada pela deformação plástica e pelo fluxo de calor. Sofre o processo de recristalização dinâmica e sempre apresenta grãos equiaxiais muito finos, no intervalo de 2 a 5 micrometros. A largura dessa região está diretamente ligada a geometria da ferramenta, uma vez que seu tamanho é maior que o diâmetro do pino, e sempre menor em relação as dimensões do ombro (MISHRA; MA, 2005; SANTOS et al., 2009).

A Figura 2 mostra o esquema da macrografia das zonas de solda mencionadas anteriormente.

Figura 2 – Esquema da macrografia de uma solda pelo processo FSW



Fonte: Adaptado de Nandan, DebRoy e Bhadeshia (2008)

A Figura 3 revela a macrografia da união realizada pelo processo FSW em uma liga de alumínio AA 5052, como pode ser observada, a semelhança entre o modelo e macrografia real é inegável.

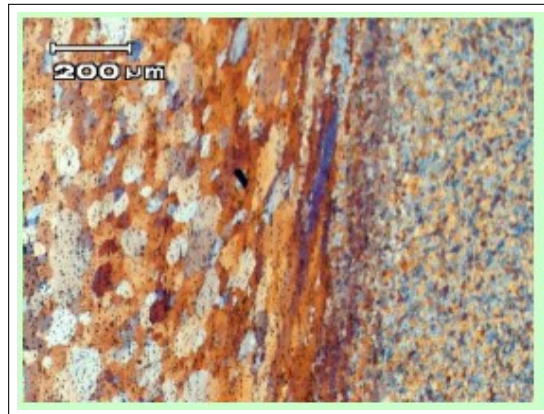
Figura 3 – Macrografia de liga AA5052 soldada pelo processo FSW



Fonte: Capelari (2006)

A Figura 4 exhibe nitidamente três regiões citadas por Threadgill (1999). Mais a direita da imagem, esta a ZM com grãos extremamente pequenos devido ao processo de recristalização dinâmica. Ao centro da figura com microestrutura visivelmente distinta, grãos deformados e orientados praticamente na vertical está a ZTMA. A

Figura 4 – Micrografia de liga de alumínio 6063



Fonte: [Paiva \(2009\)](#)

esquerda onde os grãos apresentam formato equiaxial e tamanho consideravelmente maior está a ZTA.

2.2.2 Assimetria do processo e fluxo de material

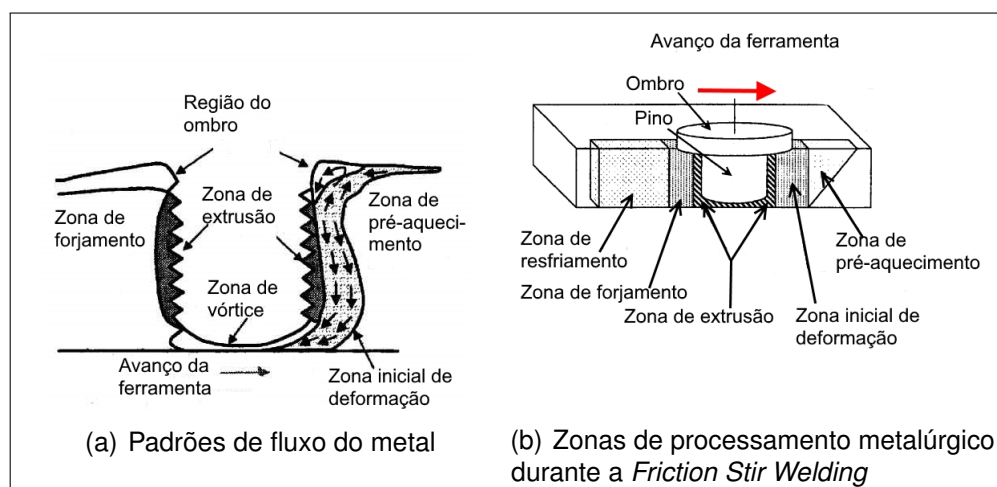
Para [Arbegast \(2003\)](#) as características do fluxo de metal no método FSW assemelham-se aos processos de conformação a quente, extrusão e forjamento. Assim sendo, a região soldada pode ser particularizada em cinco regiões:

- Zona de pré-aquecimento- Localizada na região anterior ao pino, nesse local a temperatura eleva-se devido a fricção da ferramenta em rotação e a deformação do material;
- Zona inicial de deformação- Essa região forma-se ao passo que a ferramenta avança e a temperatura do material atinge a temperatura crítica de fluxo. O material é impelido para cima, em direção ao ombro da ferramenta e simultaneamente a baixo para zona de extrusão;
- Zona de extrusão- Aqui o metal flui no entorno do pino, partindo da região anterior em direção a posterior;
- Zona de forjamento- A partir da região frontal o material é direcionado para a cavidade deixada pelo pino sob condições hidrostáticas de pressão. O ombro da ferramenta age de maneira a restringir o material, aplicando uma força de forjamento para baixo;

- Zona de resfriamento- Nessa região o material resfria de maneira passiva ou forçada.

O fluxo de metal e as zonas de processamento metalúrgico citados por [Arbegast \(2003\)](#) são mostradas na [Figura 5](#).

Figura 5 – Caracterização dos processos metalúrgicos envolvidos



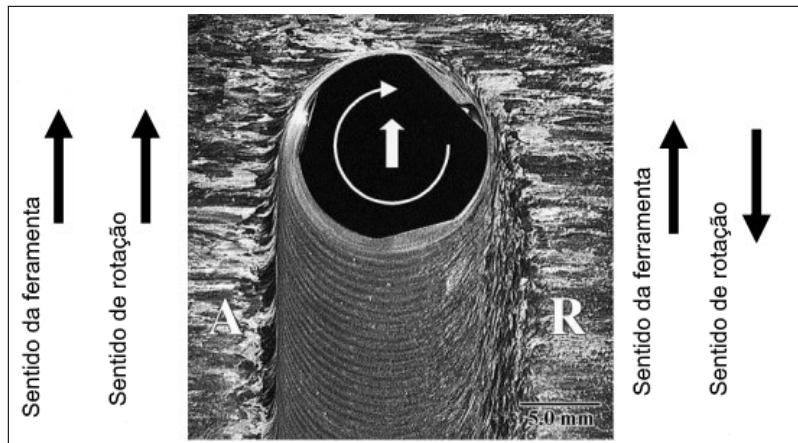
Fonte: Aptado de [Mishra e Ma \(2005\)](#)

O movimento de translação associado a rotação da ferramenta produz diferentes velocidades relativas de deslocamento no material a ser soldado, essa diferença influencia a produção de calor, o fluxo de material plastificado assim como a microestrutura e consecutivamente as propriedades mecânicas.

A posição da união em que a velocidade tangencial e de translação da ferramenta possuem o mesmo sentido é denominado lado de avanço, consecutivamente, onde a velocidade tangencial e de translação apresentam sentidos opostos é nomeado lado de retrocesso ou recuo ([PAIVA, 2009](#); [LOPEZ, 2012](#)).

A [Figura 6](#) mostra claramente uma fronteira no lado de avanço. Após a zona termo-mecanicamente afetada os grãos deformados dão origem a zona de mistura de maneira súbita. Já o lado de retrocesso não apresenta essa fronteira claramente, devido aos grãos cisalhados no entorno do ombro ([FONDA; BINGERT; COLLIGAN, 2004](#)).

Figura 6 – Assimetria entre os lados da solda



Fonte: Paiva (2009)

2.2.3 Parâmetros do processo

Para a obtenção de uma união com qualidade, vários parâmetros devem ser ajustados para tal. A maioria dos autores costumam citar a geometria da ferramenta, velocidade angular e de avanço da ferramenta, profundidade de penetração do pino, ângulo de inclinação como as principais variáveis do processo (MISHRA; MA, 2005; CAPELARI, 2006; FIORAVANTI, 2008; ALMEIDA, 2013).

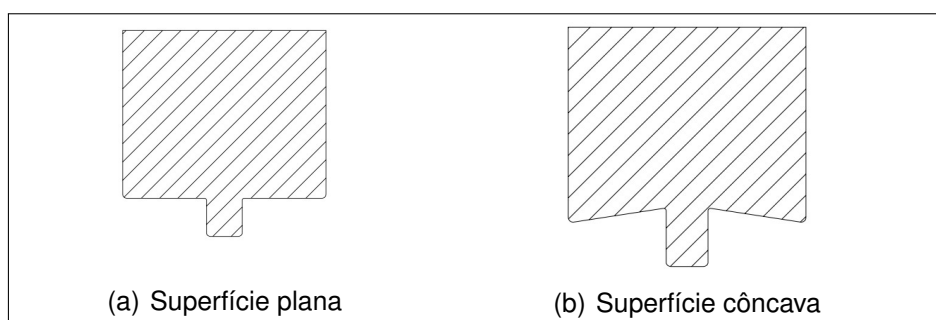
2.2.3.1 Geometria da ferramenta

Com objetivo de gerar calor e facilitar o fluxo de material, a ferramenta utilizada no processo FSW tem grande interferência no resultado final da união. A parcela mais significativa de calor proveniente do processo é gerado pelo atrito entre o ombro e a peça a ser soldada. Este pode ter base plana, côncava ou convexa além de disso, lisa ou estriada. As bases de geometria côncava melhoram o confinamento do material expurgado pelo pino, funcionando como uma reserva. As ferramentas cujas bases do ombro possuem estrias podem dispensar o ângulo de inclinação, uma vez que as estrias direcionam o material oriundo da periferia para o pino. Agora as bases convexas estriadas, podem ser usadas quando não há necessidade de contato entre a periferia do ombro e o material a soldar, aumentando a flexibilidade na área de contato (MISHRA; MA, 2005; FULLER, 2007).

A Figura 7 distingue uma ferramenta com base do ombro plana e côncava. A superfície plana apesar de mais utilizada, costuma gerar um grande volume de rebarba,

pois o material expulso pelo pino tende a alojar-se na periferia do cordão. No entanto a utilização de uma superfície côncava tende a sanar esse problema, visto que o material retirado mantém-se sob a ferramenta, ainda contribui para a não formação de defeitos no interior da solda (COLEGROVE; SHERCLIFF, 2005).

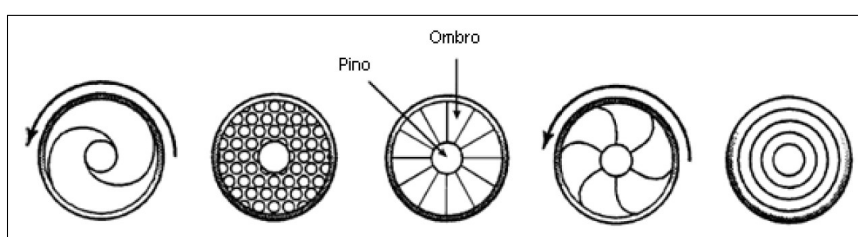
Figura 7 – Geometrias comuns para a base do ombro



Fonte: Acervo do autor

A Figura 8 ilustra outros métodos usados na base do ombro para manter o material aprisionado a baixo da ferramenta, como reentrâncias em forma de espiral, platôs no formato de hélice, superfícies escalonadas concêntricas, planos que formam volumes negativos.

Figura 8 – Geometrias complexas da base do ombro



Fonte: Adaptado de Mishra e Ma (2005)

Existe uma gama gigantesca de geometrias do pino, a mesma é definida de acordo com o material a ser soldado, tipo de junta, espessura das chapas, velocidade do processo. Podem ser cilíndricos, cônicos, facetados de geometria quadrada, triangular, lisos ou roscados. Os pinos cônicos podem ser utilizados para soldagens em espessuras elevadas a maior velocidade, dado que os principais esforços localizam-se próximos ao ombro onde sua área resistente é maior. A existência de rosca no pino aumenta o revolvimento de material por meio do transporte vertical de material. Quanto as geometrias facetadas, pode-se afirmar que as mesmas aumentam localmente a

deformação, produzindo fluxo turbulento ideal para juntas sobrepostas (KHALED, 2005; FULLER, 2007).

A Figura 9 ilustra três geometrias distintas de pino, da esquerda para direita tem-se pino liso cônico, cônico com rosca e pino liso facetado.

Figura 9 – Geometrias do pino da ferramenta



Fonte: Capelari (2006)

É sabido que as dimensões da ferramenta tem relação direta com a espessura do material a ser soldado. Souza (2010) afirma na configuração de soldagem topo, o comprimento do pino deve ser praticamente o mesmo da espessura das chapas, na ordem de décimos de milímetros menor. O diâmetro do pino deverá ser semelhante a espessura da chapas quando esse for cilíndrico, e o diâmetro do ombro próximo a três vezes o diâmetro do pino.

Mais importante que as dimensões da ferramenta, é a relação entre o volume estático (V_e) e volume dinâmico (V_d) que essa ferramenta produz. Volume estático é o volume real do pino que depende de suas dimensões, e volume dinâmico é o volume representativo, aparente, quando o mesmo está em rotação. Mishra e Ma (2005) menciona que ferramentas com elevada razão entre V_d e V_e ampliam o escoamento de material no entorno do pino, com isso é possível reduzir a força de soldagem. O aumento dessa razão é reflexo da utilização de ferramentas de geometrias complexas, com roscas, filetes e ranhuras.

A ferramenta utilizada no processo FSW está sujeita a elevados esforços de reação do material, desgaste e calor. Para que o processo possua alta repetibilidade, o material selecionado para a fabricação da ferramenta deve suportar as condições que a mesma está submetida.

Para Souza (2010) grande parte do desgaste ocorrido se dá na etapa de penetração da ferramenta nas partes a soldar, ocasionado pela elevada tensão necessária para deformar o material não aquecido. Segundo Threadgill (1999) é importante evitar interações entre o material da ferramenta e as ligas a unir, devido a afinidades químicas compostos intermetálicos podem ser formados na interface e prejudicar a integridade da ferramenta.

Os materiais empregados devem possuir boa conformabilidade, para que a fabricação de sua geometria não se torne excessivamente onerosa. Para evitar a perda de calor via ferramenta deve-se optar por materiais de baixa condutividade térmica. Geralmente a escolha do material está diretamente vinculada ao custo-benefício do mesmo, ficando em segundo plano certas idealizações. Nesse contexto é possível citar o aço ABNT H13, muito utilizado, contudo possui baixa resistência ao desgaste se comparado aos aços ABNT M35 e ABNT T15. O aço ABNT O-1, ligas de tungstênio e aços revestidos com carbetos/nitretos de titânio também são muito utilizados (SOUZA, 2010).

2.2.3.2 Velocidade angular e de avanço na ferramenta

A mistura do material em torno do pino esta fortemente vinculada a rotação da ferramenta, enquanto a velocidade de avanço é responsável por deslocar o material da parte dianteira em direção a traseira. Rotações elevadas tendem a produzir um revolvimento mais intenso de material, devido a elevação da temperatura e diminuição da resistência mecânica. Entretanto, existe um platô para o aumento da temperatura em função da taxa crescente de rotação, dado que o coeficiente de atrito altera-se com o aquecimento do material (MISHRA; MA, 2005; CAPELARI, 2006; ALMEIDA, 2013).

Aumentar indefinidamente a rotação da ferramenta não gera mais calor, portanto é preciso modificar os demais parâmetros do processo para que seja alcançado a temperatura almejada. Para isso, a utilização de velocidades de avanço reduzidas são recomendadas (ZETTLER et al., 2005). Ainda, segundo Colegrove e Shercliff (2005), o aumento da rotação na ferramenta conduz a uma diminuição na zona de mistura, o autor justifica esse fato pela diminuição dos esforços envolvidos na região próxima ao pino.

Escolher os parâmetros adequados proporciona uma solda de melhor qualidade

e maior vida útil há ferramenta. Caso o calor gerado seja insuficiente a ferramenta se desgastará rapidamente, diminuindo a reprodutibilidade das soldagens e aumentando a presença de vazios na microestrutura. Em contrapartida, aquecimento excessivo pode gerar trincas e a diminuição da espessura da junta (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008; CERVEIRA, 2008).

De maneira qualitativa baixa rotação associada a alta velocidade de avanço gera menos energia térmica, o que dificulta a união do material. Utilizando alta rotação e baixa velocidade de avanço, é possível sanar o problema de não união, mas devido a alta taxa de resfriamento surgem microtrincas. Portanto, é de suma importância conhecer os parâmetros ideais, que minimizem os defeitos e aprimorem as propriedades mecânicas.

2.2.3.3 Ângulo de inclinação e penetração da ferramenta

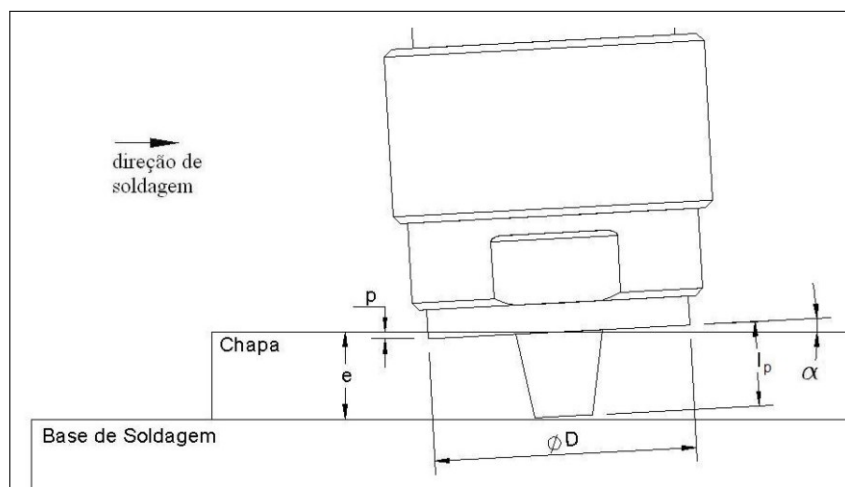
No processo FSW é conveniente utilizar um determinado ângulo de inclinação entre a ferramenta e o material a unir. A inclinação da ferramenta de maneira que a parte anterior do ombro permaneça elevada, propicia o deslocamento do material agitado para a parte traseira e devido a pressão existente o material estabelece-se nessa região (CAPELARI, 2006; ALMEIDA, 2013).

A Figura 10 apresenta um esquema em vista lateral da ferramenta, com pino inserido na chapa. Onde a espessura da chapa (e), penetração do ombro (p), diâmetro do ombro (D), comprimento do pino (lp) são variáveis geométricas que estão relacionadas ao ângulo de inclinação (α).

Em seu estudo a cerca do ângulo de inclinação ideal para a união da liga AA5456, Chen et al. (2006) verificou que para ângulos pequenos ($\alpha = 1^\circ$), a solda não se efetiva e apresenta defeito superficial. Utilizando angulo maior ($\alpha = 3,5^\circ$) a solda consolida-se perfeitamente, sem presença de defeitos. Já para ângulo de $4,5^\circ$ há grande formação de rebarba e ausência de material plastificado na zona central da solda.

Por meio da Figura 10 fica claro a relação entre profundidade de inserção, comprimento do pino e ângulo de inclinação. Quando a inserção é insuficiente o ombro não entra em contato com o material, produzindo ranhuras e sulcos na região posterior

Figura 10 – Ferramenta FSW e variáveis geométricas relacionadas

Fonte: [Capelari \(2006\)](#)

ao ombro devido a redução de pressão e temperatura. Se a inserção for demasiada, o ombro da ferramenta mergulha no objeto, originando rebarba excessiva, e solda côncava ([MISHRA; MA, 2005](#); [CAPELARI, 2006](#)).

2.2.4 Defeitos na solda

O número de discontinuidades no processo FSW é significativamente menor se comparado aos métodos típicos por fusão. Contudo, certos defeitos são característicos do processo quando mal executado, os mesmos podem ser frutos do projeto incorreto da ferramenta, seleção de parâmetros equivocados ou a combinação de ambos. Os defeitos mais comuns podem ser de três tipos: vazios, defeitos na raiz ou *kissing bonds* ([JAMES et al., 2005](#); [LOPEZ, 2012](#)).

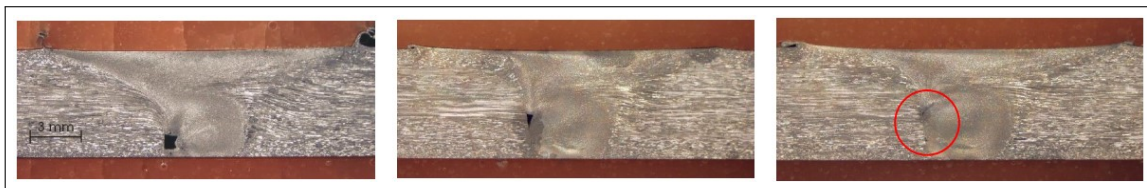
Os vazios ou cavidades como são chamados, são a falta de material oriunda de um escoamento em estado sólido ineficaz segundo [James et al. \(2005\)](#). Para [Kim et al. \(2006\)](#) isso pode ocorrer pela associação de elevada rotação e altos avanços na ferramenta, causando fluxo descontínuo do material plastificado. Já [Hiller \(2007\)](#) afirma que este defeito é proveniente do aporte ineficaz de calor, que dificulta o forjamento do material pelo ombro.

A ocorrência deste defeito praticamente inviabiliza a utilização da união, uma vez que há redução significativa das propriedades mecânicas por razão da concentração de tensões localizada no entorno do vazio. Estudos realizados em liga de alumínio

2024-T351 relatam redução da resistência mecânica e alongamento para 75% e 10%, em relação ao material base (ZETTLER et al., 2005).

Na Figura 11 vemos alguns dos resultados de Capelari (2006) para a união da liga de alumínio AA5052. Onde a variação do ângulo de inclinação da ferramenta de 1° na amostra da esquerda, para 3° na amostra posicionada a direita, diminuiu drasticamente o tamanho da descontinuidade.

Figura 11 – Redução na descontinuidade com ajuste do ângulo de inclinação da ferramenta



Fonte: Capelari (2006)

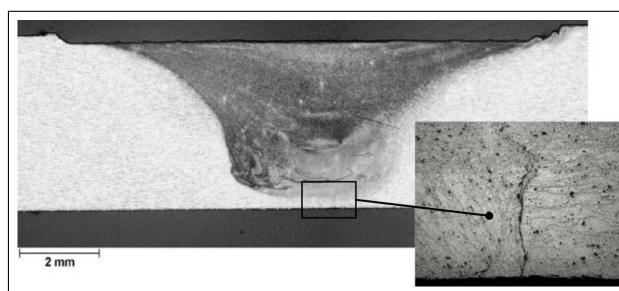
Na visão de Leonard e Lockyer (2003 apud ALMEIDA, 2013) os chamados defeitos de raiz, são originados quase que exclusivamente por penetração insuficiente do pino da ferramenta. Ainda assim, o autor menciona um possível desalinhamento entre ferramenta e linha de junta, além de camada de óxido não dispersada durante o processo como possíveis causas do defeito. James et al. (2005) sugere que o pino deva penetrar ao menos 90% da espessura do material para que não ocorram defeitos de raiz, o autor ainda menciona as variações de espessura das chapas e suporte de fixação empenado como razões da descontinuidade.

Geralmente esse tipo de defeito causa a a fratura na ZTA ou ZTMA, porque as mesmas possuem maiores variações nas propriedades mecânicas em relação a zona de mistura (ARBEGAST, 2008 apud MARCONATO, 2009).

A presença deste defeito, como mostra a Figura 12 compromete gravemente o desempenho mecânico da junta, uma vez que a seção resistente é menor que o esperado e o entalhe deixado atua como um concentrador de tensões (MARCONATO, 2009).

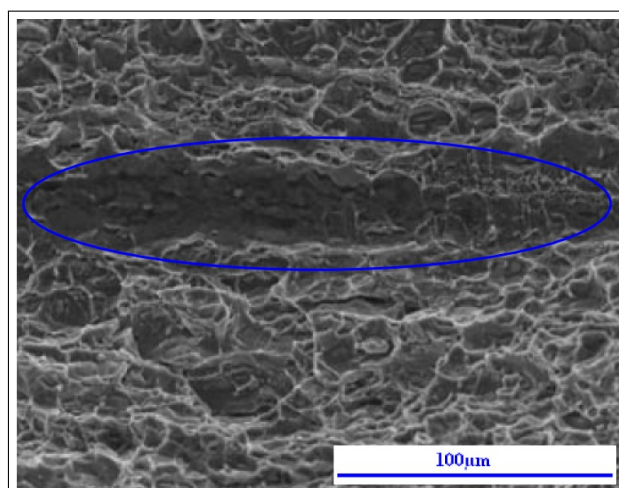
A nível microscópico, a descontinuidade chamada *Kissing bonds* ocorre quando a interação das rugosidades superficiais envolvidas, não são suficientemente fortes para formar novas ligações químicas. Este tipo de defeito pode ser causado pela

Figura 12 – Defeito de raiz



Fonte: Zettler et al. (2005)

deformação plástica a quem do necessário, ou pela falta de rigidez do dispositivo de fixação (OOSTERKAMP; OOSTERKAMP; NORDEIDE, 2004).

Figura 13 – *Kissing bond*

Fonte: Adaptado de Oosterkamp, Oosterkamp e Nordeide (2004)

Na Figura 13 é apresentada uma superfície de fratura da liga de alumínio 6082 utilizada no estudo de Oosterkamp, Oosterkamp e Nordeide (2004). Ao centro existe uma região onde a superfície de fratura é descontínua, indicando que ali não ocorreu ligação metalúrgica entre as duas superfícies.

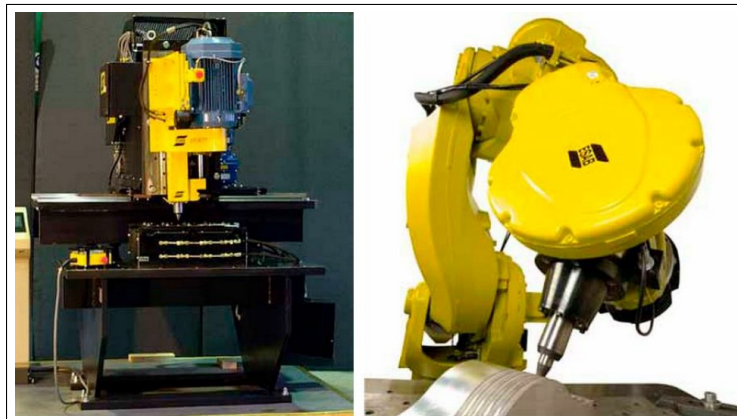
2.2.5 Equipamentos

Para a realização do processo FSW diversos equipamentos podem ser utilizados. Máquinas dedicadas exclusivamente ao processo, centros de usinagem e máquinas fresadoras mecânicas, idênticas as usadas em usinagem.

As máquinas dedicadas tratam-se de robôs, capazes de unir peças de elevada

espessura em grande velocidade e portanto devem suportar elevados esforços. A elevada robustez das máquinas dedicadas é característica notória nas mesmas, ainda contam com sensores de monitoramento de esforços, temperatura e posicionamento, ideais para o controle perfeito dos parâmetros. O controle da força aplicada durante o processo é essencial, quando não há garantia de rigidez suficiente do sistema. Mudanças inesperadas no caminho programado, podem gerar graves defeitos na união (ALMEIDA, 2013; GIBSON et al., 2014).

Figura 14 – Equipamentos exclusivos para a realização do processo FSW



Fonte: Adaptado de Esab (2016)

A Figura 14 exibe dois modelos de equipamentos dedicados ao processo FSW. Um deles trata-se de um braço robótico mencionado anteriormente, o outro segue o conceito de um pórtico, com cabeçote ou mesa móvel.

Os centros de usinagem, distinguem-se das máquinas dedicadas por serem menos robustos. Nesse tipo de equipamento a ferramenta é adaptada no eixo árvore que movimenta-se em três eixos, enquanto a peça é fixada em um dispositivo e permanece imóvel durante o processo (SOUZA, 2010). Já as fresadoras convencionais apresentam apenas movimento vertical na ferramenta, e a mesa onde está montada a junta movimenta-se no plano.

Por motivo do alto custo de um equipamento específico para o processo e devido a disponibilidade dos mesmos, em termos de pesquisas e experimentos realizados no Brasil o mais corriqueiro é a utilização de fresadoras convencionais e centros de usinagem.

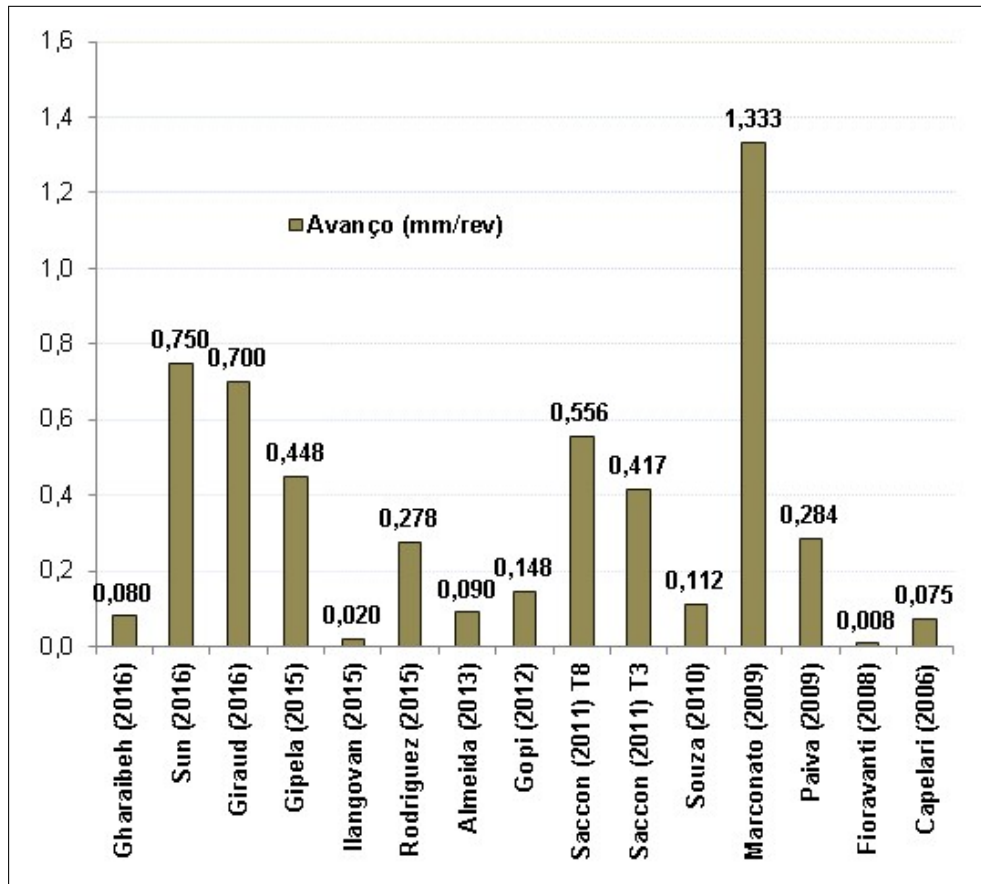
2.3 Uniões de ligas alumínio

Dentre os trabalhos publicados mais recentemente encontra-se o de [Gharaibeh, Al-Jarrah e Sawalha \(2016\)](#), os autores estudaram a interferência da geometria da ferramenta sobre as propriedades mecânicas, na união de chapas de 6 mm de espessura da liga 6061. Os mesmos fizeram uso de três geometrias distintas de pino, ambas foram fabricadas de modo a possuir seção transversal inscrita em um círculo de 6 mm de diâmetro sejam elas de geometrias prismáticas triangular, quadrada ou hexagonal. O autor verificou que independente da geometria do pino a microdureza da união eleva-se com o aumento da velocidade de avanço e de rotação, porém a resistência mecânica teve seu ápice próximo a 1120 rpm utilizando velocidade de avanço 90 mm/min. A fim de reforçar os parâmetros obtidos, mantiveram constante a rotação da ferramenta em 1120 rpm e utilizaram diversas velocidades de avanços, o resultado obtido foi idêntico ao experimento anterior.

Outro trabalho recente mostra a união dissimilar em chapas de 2 mm de espessuras, das liga de alumínio de granulometria ultra fina (UFG) 1050 e a liga 6061-T6. Os pesquisadores [Sun, Tsuji e Fujii \(2016\)](#) empregaram ferramenta de ombro côncavo e pino roscado (dimensões mostradas na [Tabela 14](#)), rotação fixa de 800 rpm e velocidade de avanço no intervalo entre 400 e 1000 mm/min. Essa pesquisa comprovou a influência do fluxo de material e assimetria do processo, visto que a união só obteve qualidade satisfatória quando a liga 6061-T6 foi posicionada no lado de avanço. Concluíram também que o aumento excessivo da velocidade de avanço gera a fragilização da união devido ao baixo aporte térmico, e uma velocidade de avanço em torno de 600 mm/min seria a ideal para essa configuração.

As várias combinações entre velocidade de avanço e rotação utilizadas pelos autores ([Tabela 13/Apêndice B](#)) aliada as demais variáveis envolvidas no processo, dificultam a comparação direta entre os resultados. A utilização de diferentes tipos de máquinas para execução dos experimentos como fresadoras, centro de usinagem e máquinas dedicadas influenciam diretamente nos parâmetros adotados durante a execução dos experimentos. Outro parâmetro de forte interferência na comparação dos resultados é a geometria da ferramenta, pois a mesma tem relação direta com a espessura do material a ser unido.

Figura 15 – Avanço em mm/rev utilizados em diversos trabalhos



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma maneira de diminuir os parâmetros e tentar encontrar uma relação entre os diversos trabalhos, é utilizar a razão entre a velocidade de avanço e a velocidade rotação da ferramenta. Assim teremos uma variável de unidade milímetros por revolução (mm/rev).

Pode-se observar na [Figura 15](#) que o avanço utilizado pelos autores esteve na maioria dos casos a baixo de 0,6 mm/rev independentemente da espessura e tipo de material a ser soldado. Porém, deve ser mencionado o estudo de [Marconato \(2009\)](#) que utilizou valor de avanço mais elevado, o mesmo fez uso de equipamentos dedicados exclusivamente ao processo FSW e ferramentas patenteadas de elevada complexidade.

Os autores mostrados na [Figura 15](#) que fizeram uso de velocidades de avanço inferiores a 0,2 mm/rev estavam utilizando fresadoras convencionais. A escolha por determinada velocidade de avanço ocorreu devido aos elevados esforços sobre o equipamento, e também objetivando a redução dos vazios na união.

3 METODOLOGIA

Esta é a etapa da pesquisa onde são descritas as metodologias e procedimentos realizados para obtenção dos resultados. Sendo esta, uma pesquisa de natureza aplicada, visto que se propõe a analisar um determinado método de soldagem empregado em ligas de alumínio. Possui objetivos explicativos pois propõe-se a avaliar e explicar fenômenos, relacionando causa e consequência. Realizada com procedimentos experimentais, para controle e avaliação do resultados.

O trabalho realizado objetivou por meio de uma aproximação experimental, realizar o processo FSW em um centro de usinagem Romi D800 adaptado para a união das chapas da liga AA 6060-T5 de 4,75 mm de espessura e posteriormente, avaliar qualitativamente e quantitativamente a qualidade das uniões produzidas.

3.1 Delineamento da pesquisa

Para atingir os objetivos propostos nessa pesquisa, foi realizado levantamento de metodologias e resultados na bibliografia, com enfoque nos parâmetros adotados pelos autores. Esse levantamento permitiu identificar qual o nível dos parâmetros produz melhores resultados.

Na sequência foi necessário planejar a aquisição e fabricação dos materiais e ferramentas necessárias para a realização das soldagens. Após efetivada as etapas de fabricação das ferramentas e de soldagem, ensaios são realizados para relacionar resultados e parâmetros selecionados, apontando os fenômenos presentes.

Os dados coletados nos ensaios são organizados em gráficos e tabelas para que fique mais visível a existência ou não, de padrão nos dados coletados e para que análise dos mesmos ocorra de maneira imparcial.

3.1.1 Seleção dos materiais e equipamentos

Esta seção do trabalho está destinada a relatar a forma de utilização dos materiais, ferramentas e equipamentos. A liga de alumínio soldada, o dispositivo fabricado para a fixação das chapas, o equipamento em que foram realizadas as

soldagens e a geometria da ferramenta empregada.

3.1.1.1 Material base

O material utilizado nesse estudo trata-se da liga de alumínio AA6060-T5 laminada, adquirida na empresa Irmãos Galeazi Ltda, situada na cidade de Porto Alegre/RS. O material foi adquirido na forma de chapas retangulares nas dimensões 63,5 mm por 4,75 mm (largura e espessura).

Na [Tabela 4](#) encontra-se a composição química do material utilizado nesse estudo, mais abaixo na [Tabela 5](#) estão dispostas as propriedades mecânicas, ambas de acordo com certificado de procedência no Anexo A.

Tabela 4 – Composição química da liga AA6060

(%)	Cu	Mg	Mn	Si	Cr	Outros
Min	-	0,35	-	-	-	-
Max	0,1	0,6	0,1	1	0,1	0,15

Fonte: Adaptado do certificado de qualidade

Devido a versatilidade a liga escolhida, é altamente empregada em situações que exigem moderada resistência e boa resposta a anodização, seja ela decorativa ou protetiva. Além de apresentar resistência a corrosão é de fácil soldagem e extrusão, por isso, é muito utilizada na construção civil e indústrias do setor automotivo.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga AA6060-T5

	Limite de Resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
Min	147	108	8	66

Fonte: Adaptado do certificado de qualidade

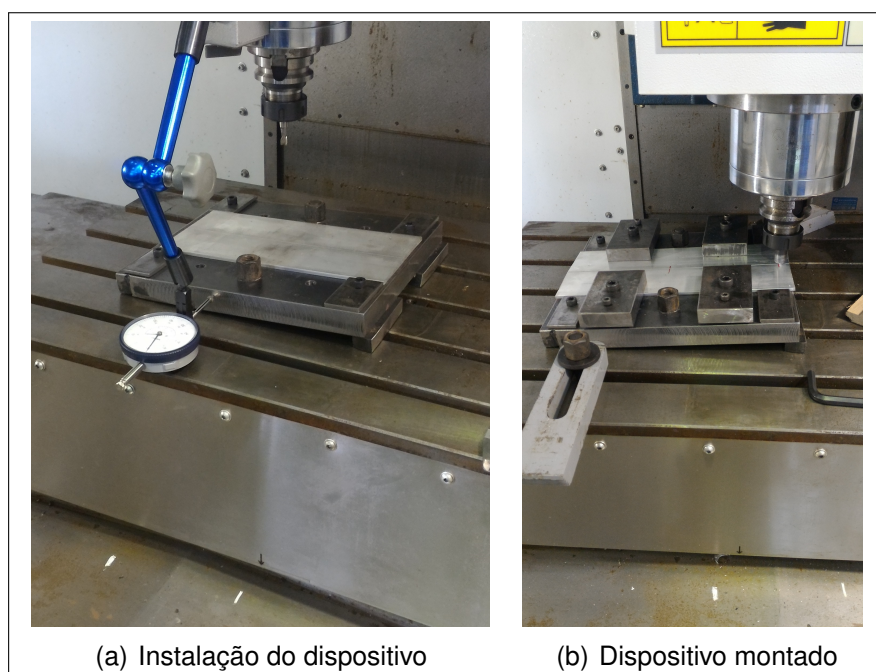
Para a criação dos corpos de prova de soldagem foi necessário seccionar as chapas de alumínio adquiridas em tamanho comercial de 1,5 m. O comprimento selecionado para elas foi 290 mm e posicionando-as lado a lado formam a junta a ser soldada.

3.1.1.2 Dispositivo de fixação das chapas

Para a execução deste trabalho foi necessário fabricar o dispositivo com ângulo de inclinação de $3,1^\circ$, uma vez que o equipamento selecionado para o processo não

possui tal grau de liberdade. Diversos autores mencionam a utilização do ângulo de inclinação para a realização de união livre de defeitos, dessa forma o ângulo foi escolhido com referência em dados de trabalhos semelhantes, mostrados no [Apêndice B](#). Além disso, optou-se por uma construção extremamente robusta que pudesse prover a rigidez necessária ao processo. A [Figura 16](#) mostra a instalação e disposição final do aparato de fixação das chapas, momentos antes do início de uma soldagem.

Figura 16 – Dispositivo de fixação das chapas



(a) Instalação do dispositivo

(b) Dispositivo montado

Fonte:Acervo do autor

O dispositivo de fixação foi acoplado ao equipamento por meio dos rasgos existentes na mesa de trabalho, para isso foram utilizados parafusos M16 classe 10. Para evitar qualquer tipo de deslocamento, calços foram colocados em ambos os lados do dispositivo.

3.1.1.3 Equipamento para as soldagens

As soldagens foram realizadas em um centro de usinagem ROMI®, modelo D 800 idêntico a [Figura 17](#), pertencente à Universidade Federal do Pampa. Este equipamento caracteriza-se como centro de usinagem vertical CNC GE Fanuc oi-MC, de potência instalada no motor principal de 15 kW e potência total de 30 kW, faixa de operação entre 7 e 7500 rpm. A seleção deste equipamento para a realização das

soldagens deve-se a disponibilidade, rigidez e robustez necessárias para a execução dos processos.

Figura 17 – Centro de usinagem CNC ROMI D 800

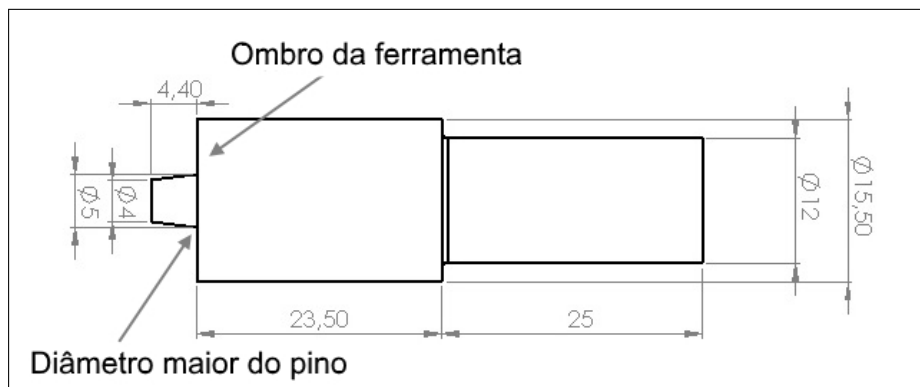


Fonte: Acervo do autor

3.1.1.4 Desenvolvimento da ferramenta

A geometria de ferramenta utilizada no processo foi usinada a partir de uma barra de diâmetro 19 mm de aço rápido ABNT M2 disponível no laboratório de máquinas da UNIPAMPA. Terminada a usinagem, as ferramentas foram tratadas termicamente na empresa Multfer Indústria e Comércio de Ferramentas Ltda, situada na cidade de Sapucaia do Sul/RS. Devido ao desgaste do processo é importante que elas possuam dureza mínima de 55 HRC. A [Figura 18](#) mostra a geometria da ferramenta fabricada.

Figura 18 – Geometria utilizada na ferramenta



Fonte: Acervo do autor

A geometria projetada segue as recomendações da literatura e acompanha a tendência dos trabalhos mostrados no [Apêndice B](#). O pino deve ter comprimento

mínimo equivalente a 90% da espessura do material a ser soldado, dessa forma o comprimento de 4,4 mm satisfaz esse requisito, já que a espessura do material é 4,75 mm. Por meio das pesquisas realizadas até o presente momento, verifica-se que o diâmetro maior do pino adotado pelos autores é similar a espessura do material ou levemente maior, assim sendo, foi decidido utilizar 5 mm. O diâmetro menor do pino foi selecionado com base no trabalho de [Buffa et al. \(2006\)](#), nesse estudo o autor mostra o maior aporte de calor com o aumento do ângulo do cone, entretanto, isso eleva os esforços verticais sobre o eixo da máquina. A partir disso foi selecionado ângulo próximo a $6,5^\circ$ e consecutivamente 4 mm para o diâmetro menor. A dimensão do ombro é geralmente adotada como sendo três vezes o diâmetro maior do cone, assim sendo, a ferramenta foi planejada com 15,5 mm diâmetro para o ombro. O uso de superfície côncava é citada como vantajosa para o processo pois diminui a formação de rebarbas, entretanto, a maior complexidade para fabricação dessa concavidade fez com que a opção seja por um ombro plano.

3.1.2 Delineamento dos experimentos

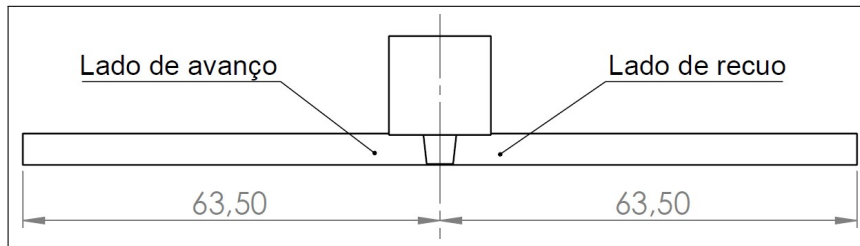
Nesta seção do trabalho serão descritos os procedimentos principais do processo de soldagem. Dentre eles o posicionamento da ferramenta em relação a linha de junta, o deslocamento da ferramenta na execução das soldagens e os parâmetros adotados para a realização das soldagens.

3.1.2.1 Posicionamento da ferramenta

Quando o tema em discussão é a soldagem na configuração topo, alguns autores costumam utilizar a ferramenta desalinhada em relação a linha de junta. Isso é comum na união de materiais dissimilares, com propriedades mecânicas muito distintas. Nesses casos, a ferramenta é posicionada quase que inteiramente sobre o material de maior ductibilidade no lado de recuo.

A influência da posição da ferramenta em relação a linha de junta não é abordada nesse trabalho, portanto optou-se pelo posicionamento coincidente entre centro da ferramenta e linha de junta. A [Figura 19](#) mostra o posicionamento da ferramenta adotado nos experimentos.

Figura 19 – Posição da ferramenta sobre a linha de junta

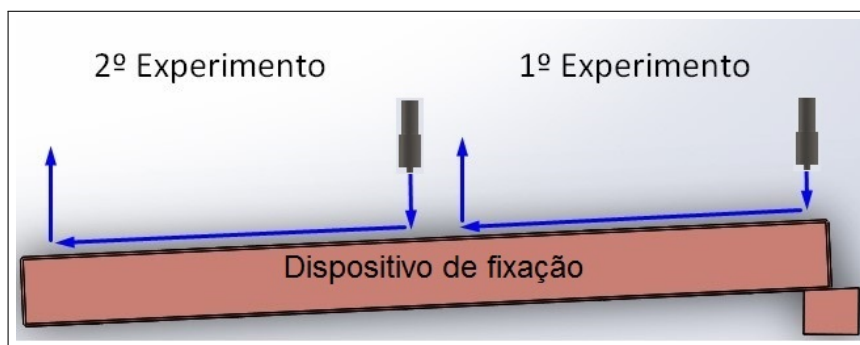


Fonte: Acervo do autor

3.1.2.2 Deslocamento da ferramenta

Devido a disponibilidade de material para os experimentos, foi necessário realizar duas soldagens com tratamentos distintos no mesmo corpo de prova. A [Figura 20](#) ilustra o deslocamento da ferramenta para a realização de duas soldagens.

Figura 20 – Deslocamento da ferramenta nas soldagens



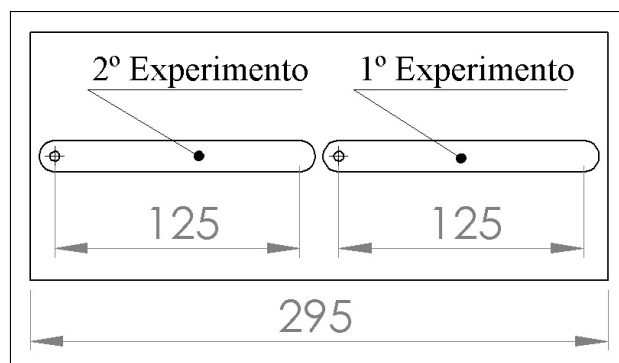
Fonte: Acervo do autor

Os procedimentos realizados para soldagem seguem a seguinte descrição:

- a) Posicionamento da ferramenta em íntimo contato com as superfícies e penetração de 0,15 mm do pino;
- b) Ferramenta girando no sentido horário com frequência pré-determinada penetra o material em 4,4 mm com velocidade de 10 mm/min;
- c) Após o pino estar totalmente imerso, tempo de espera de 2 segundos;
- d) Deslocamento da ferramenta ao longo da linha de solda com velocidade de avanço pré-determinada;
- e) Retirada da ferramenta do material;
- f) Intervalo entre soldagens de 10 minutos.

O tempo de 10 minutos foi estipulado para observações, correções quando necessárias e para o resfriamento do material e dispositivo de fixação. Após esse tempo a ferramenta era posicionada para uma nova soldagem. A [Figura 21](#) mostra o comprimento dos cordões de solda, produzidos seguindo a metodologia descrita anteriormente.

Figura 21 – Corpo de prova com dois cordões de solda distintos



Fonte: Acervo do autor

3.1.2.3 Matriz de variáveis

Neste trabalho foram utilizados seis tratamentos estatísticos para os experimentos, dois níveis para a velocidade de avanço e três níveis para a velocidade de rotação. Além de quatro repetições, totalizando 24 amostras.

Para estabelecer uma classificação entre os experimentos realizados, os cordões de solda foram numerados de 01 a 24 em função dos níveis das variáveis adotadas, estas variáveis encontram-se na [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Tratamentos utilizados nas soldagens

Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade de Rotação (rpm)											
	1000				1500				2000			
30	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
50	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Fonte: Elaborado pelo autor

A [Tabela 6](#) apenas ilustra como foram numerados os cordões de solda, a sequência de realização dos experimentos foi determinada de forma totalmente randômica pelo *software* Microsoft Office Excel®.

3.2 Forma de coleta de dados

A forma de coleta de dados deu-se por meio de ensaios qualitativo e quantitativos em amostras retiradas da união. Para análise qualitativa, inspeção visual e imagens da macrografia das amostras foram realizadas, para análise quantitativa, ensaios de microdureza e tração foram utilizados. Esta seção dedica-se a explicar os procedimentos executados nessas análises e ensaios.

3.2.1 Inspeção visual

A inspeção visual do cordão é a primeira avaliação realizada após uma soldagem. Neste tipo de análise pode ser constatada a união ineficaz, pelo excesso de cavidades, existência de trincas, penetração insuficiente, além de outros defeitos que não caracterizam a ineficácia da união, como o excesso da rebarba.

Caso a soldagem apresente defeitos suficientes para ser considerada ineficaz, o corpo de prova pode ser descartado desde já, não necessitando nenhum tipo de análise posterior, como ensaios mecânicos e análises macroestruturais.

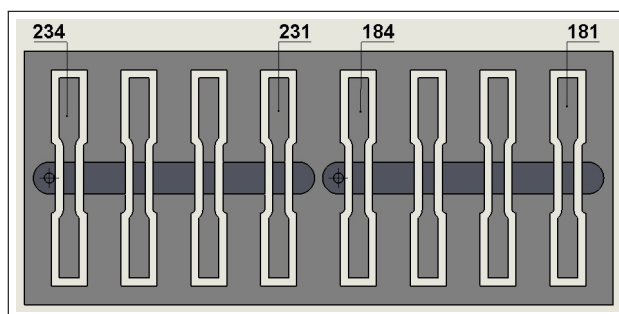
3.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração é realizado para quantificar a resistência das soldas realizadas e identificar qual a combinação de parâmetros produz melhor resultado. Os dados coletados devem ser confrontados entre si e o material base para melhor esclarecimento do processo.

Devido o número de ensaios de tração necessários, optou-se pela exclusão de um dos cordões de solda realizados em cada tratamento estatístico, isso foi realizado de maneira aleatória utilizando a numeração explicitada na [Tabela 6](#) e o *software* Microsoft Office Excel. Assim, as amostra 03, 08, 09, 15, 18 e 23 foram descartadas para a realização do ensaio de tração.

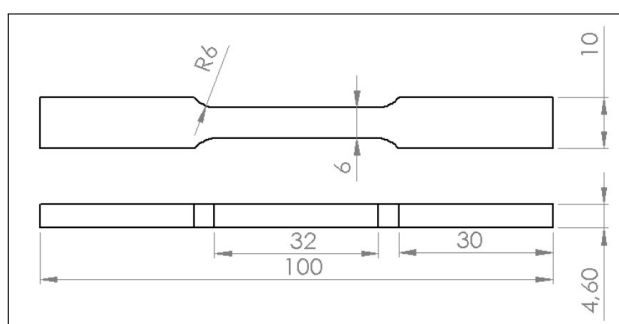
Os cordões de solda foram usinados para remoção das rebarbas e na sequência retirados de maneira transversal ao sentido de soldagem ([Figura 22](#)), seguindo a norma ASTM B 557M - *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium Alloy Product, Subsize Specimen 6 mm Wide* e suas dimensões estão expostas na [Figura 23](#).

Figura 22 – Retirada dos corpos de prova de tração



Fonte: Acervo do autor

Figura 23 – Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração



Fonte: Acervo do autor

Os ensaios foram executados na máquina SHIMADZU®, modelo AGS-X para cargas de até 5 kN, disponível na Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete. A velocidade de deslocamento utilizada foi 1 mm/min e o alongamento obtido é aquele fornecido pelo próprio equipamento, o qual desconsidera as deformações de seus mecanismos. Para evitar escorregamento das pinças que fixam o corpo de prova, um pequeno pré-alongamento de 0,11 mm foi utilizado.

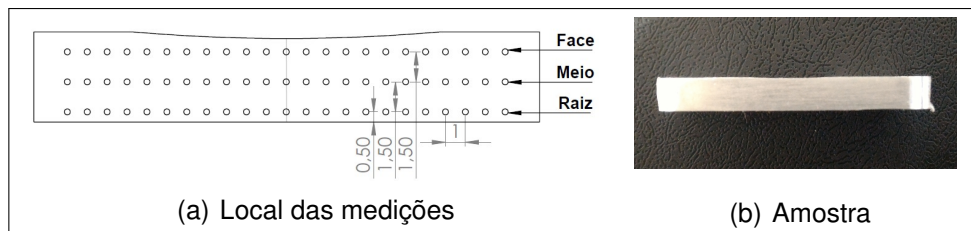
3.2.3 Medições de microdureza

Na realização das medições fez-se uso do microdurômetro BUEHLER®, modelo Micromet 6010 propriedade da Universidade Federal do Pampa disponível no campus Alegrete. As medições foram realizadas na escala Vickers com carga de prova 0,1kgf aplicada por 10 segundos, em amostras devidamente lixadas utilizando como referência a norma ASTM E384-99.

Para avaliar a microdureza na seção transversal a solda, duas amostras foram escolhidas em cada tratamento, retiradas distantes o bastante das regiões de entrada e

saída da ferramenta. Em cada uma dessas obteve-se 69 medidas, subdivididas em três perfis distintos. O perfil próximo a face inferior das chapas foi nomeado "raiz", o perfil situado próximo a face superior "face" e o perfil localizado entre os anteriores como "meio". Este processo foi repetido para cada uma das seis combinações de parâmetros adotados.

Figura 24 – Esquema de medições na seção transversal da solda



Fonte:Elaborado pelo autor

Os três perfis realizados ao longo da seção transversal da soldagem, respeitaram o espaçamento de 1 mm entre cada indentação. Criados de maneira que um deles ficasse a 0,5 mm da borda inferior da chapa, o perfil meio a exatos 1,5 mm do perfil de raiz. O perfil de face a 1,5 mm de distância do perfil central como mostra a [Figura 24](#) em seu esquema de indentações.

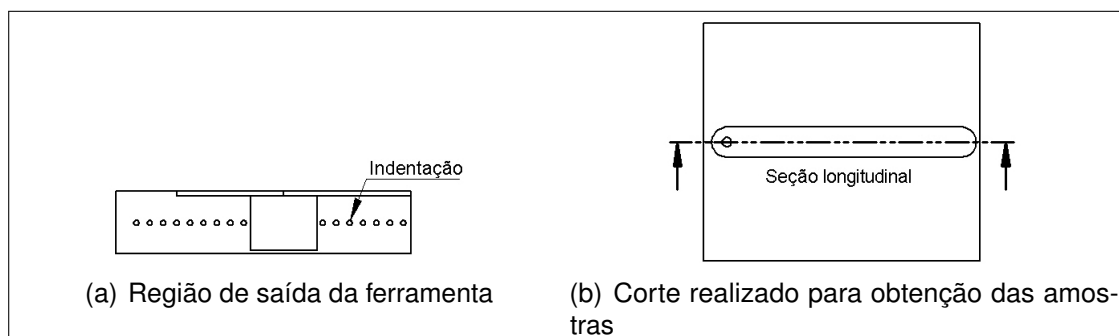
Para determinação da microdureza do material base, foi utilizada a metodologia de medições exposta na [Figura 24](#) em duas amostras de material não utilizadas nos ensaios.

Na sequência foi determinado o perfil de microdureza longitudinal na região de entrada e saída da ferramenta. Nessas regiões optou-se por perfis únicos localizados a 2,5 mm da face inferior das chapas, com espaçamento de 0,5 mm entre medições. As amostras utilizadas foram cortadas com sobre metal, para que no processo de lixamento fosse alcançada linha de junta. A [Figura 25](#) mostra o esquema de medições na região de saída da ferramenta.

3.2.4 Macrografias

As macrografias foram realizadas com os recursos disponíveis pelo laboratório de metalografia da Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete. As amostras foram cortadas transversalmente ao sentido de soldagem, optou-se pelo não embuti-

Figura 25 – Seção longitudinal para medição de microdureza



Fonte: Acervo do autor

mento das amostras devido a região de análise ter aproximadamente 2 cm de extensão, o que não dificultaria o processo de lixamento e polimento manual.

O processo de lixamento ocorreu de maneira manual pois o laboratório não possui nenhuma politriz metalográfica capaz de um desempenho satisfatório. No processo foram utilizadas lixas d'água de granulometria 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 2500.

Para bom resultado no polimento de alumínio e suas ligas é indicado o uso de pasta de diamante concentrado, nas granulometrias de 6 μm , 3 μm e 1 μm . Como o laboratório disponha apenas de alumina em suspensão, panos de polimento para alumina, as tentativas de polimento foram realizadas com estes consumíveis. Os panos disponíveis estavam bastante deteriorados, portanto optou-se por deixar as amostras em estado lixado a granulometria 2500, após exaustivas tentativas de polimento.

O reagente químico utilizado para revelar a macroestrutura da região soldada é conhecido como Keller (2 ml HF, 3 HCl, 5 ml HNO₃, 10 ml água destilada), comumente usado para revelar a macrografia e micrografia. Contudo, o tempo de ataque descrito na literatura gira em torno de 20 a 30 segundos, o que na prática não mostrou-se efetivo, por razões desconhecidas. Após sequências de lixamento e ataque com tempos de imersão variados, verificou-se que o tempo mínimo para algum resultado macroscópico foi 2 min.

4 RESULTADOS













Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados em forma de seções, dentre elas a aparência da união. Nessa etapa da pesquisa não foram constatados defeitos no processo de soldagem. Os resultados dos ensaios de tração evidenciaram o excessivo aquecimento durante o processo de soldagem, o que reduziu sensivelmente as propriedades mecânicas do material base, ocasionando redução da eficiência da junta.

4.1 Aparência da união

Por meio de inspeção visual, todas as combinações de variáveis produziram soldas satisfatórias em cada uma das quatro repetições. De início, é possível admitir que a janela de parâmetros adotada no experimento, está dentro do intervalo satisfatório.

Rebarbas foi tipo de defeito mais observado, na sequência a redução da espessura. O primeiro esteve presente de maneira excessiva para a combinação de parâmetros 30 mm/min de velocidade de avanço, 1500 e 2000 rpm. Este tipo de defeito pode ser visto na [Tabela 7](#) onde encontram-se as soldas realizadas com menor velocidade de avanço.







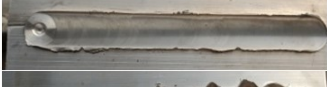

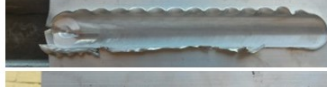



Tabela 7 – Cordões obtidos com velocidade de avanço de 30 mm/min

		Velocidade de rotação (rpm)			
		1000	1500	2000	
01		05		09	
02		06		10	
03		07		11	
04		08		12	

Fonte: Elaborado pelo autor

O surgimento de rebarbas excessivas está atrelado a utilização de geometria plana para a base do ombro. Este tipo de formato permite que o material retirado da

Tabela 8 – Cordões obtidos com velocidade de avanço de 50 mm/min

		Velocidade de rotação (rpm)			
		1000	1500	2000	
13		17		21	
14		18		22	
15		19		23	
16		20		24	

Fonte: Elaborado pelo autor

união deposite-se sobre a periferia, bem como, a penetração de 0,15 mm do ombro.

O segundo defeito, a redução de espessura, é algo intrínseco ao processo. Devido a utilização de ângulo de inclinação na ferramenta a parte posterior do ombro fica abaixo do nível das chapas, ocasionando a redução de espessura. A utilização de penetração do ombro de 0,15 mm contribuiu para este defeito, a exemplo da formação de rebarbas.

A [Tabela 8](#) contém imagens das soldas realizados com maior velocidade de avanço. Nela é possível observar que não ocorreram rebarbas de maneira concentrada nas velocidades de 1500 e 2000 rpm como mostrado no caso anterior.

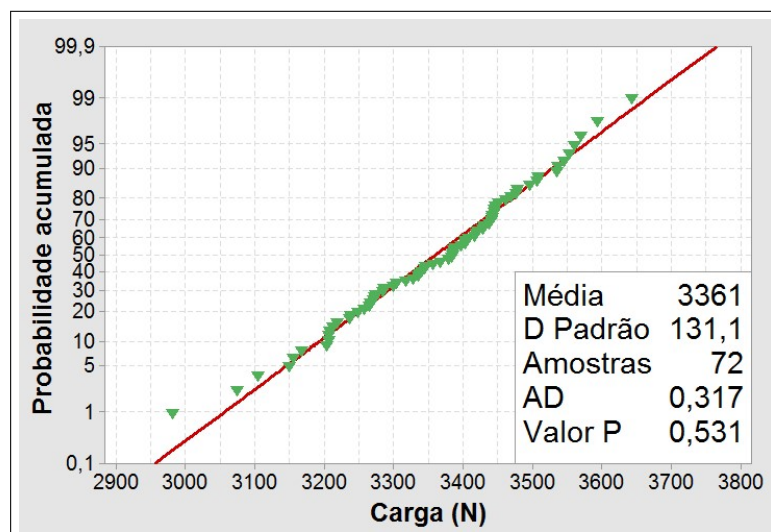
Em nenhuma das 24 soldas realizadas foram constatadas cavidades, defeitos de túnel ou algum defeito na raiz da junta. Portanto todas estão qualificadas a próxima etapa de ensaios.

4.2 Ensaio de tração

A verificação estatística baseada na análise de variância, foi possível graças a distribuição normal dos dados coletados. Para comprovação da normalidade dos dados utilizou-se o teste de Anderson-Darling por meio do *software* Minitab Statistical Software®. Esse método baseia-se, na distância entre a distribuição experimental e a distribuição teórica normal.

Portanto, os dados podem ser considerados normais se essa distância for

Figura 26 – Teste de normalidade de Anderson-Darling



Fonte: Acervo do autor

inferior a significância estipulada. Ou seja, quando valor de prova for maior ou igual a significância tem-se uma distribuição normal. Como é o caso dos dados obtidos no ensaio de tração, mostrados na [Figura 26](#).

Para a variável carga máxima, foram considerados os 12 ensaios de tração realizados em cada tratamento, dessa forma fez-se uso da análise de variância fator único para testar a igualdade entre amostras.

A hipótese nula contempla a igualdade entre os corpos de prova, ou seja, não há diferença significativa na carga máxima, submetida a cada corpo de prova a uma significância de 0,05. A hipótese alternativa indica desigualdade significativa nas cargas máximas. Os dados obtidos nos ensaios e utilizados na tabela anova estão dispostos no [Apêndice C](#).

Tabela 9 – Resumo da tabela ANOVA fator único para carga máxima

Fonte da variação	F	valor P	F crítico	Significância
Entre os tratamentos	2,27	0,058	2,35	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da análise de variância para a carga máxima estão expressos na [Tabela 9](#) de maneira resumida, nela é possível observar que o valor P é superior a significância adotada, portanto deve-se aceitar a hipótese nula de igualdade de carga máxima entre os corpos de prova. Isso significa que as cargas máximas a que foram

submetidos os corpos de prova, são estatisticamente equivalentes com uma confiança de 95%.

Com o objetivo de identificar qual parâmetro (velocidade de rotação ou de avanço) gera maior variação na resposta carga máxima, foi realizada a análise de variância fator duplo com repetição (Tabela 10).

Tabela 10 – Tabela ANOVA fator duplo para a variável resposta carga máxima

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	138260	1	138260	8,763	0,004	3,986
Rotação	39698	2	19849	1,258	0,291	3,136
Interação	1092	2	546	0,035	0,966	3,136
Dentro	1041327	66	15778			
Total	1220377	71				

Fonte: Elaborado pelo autor

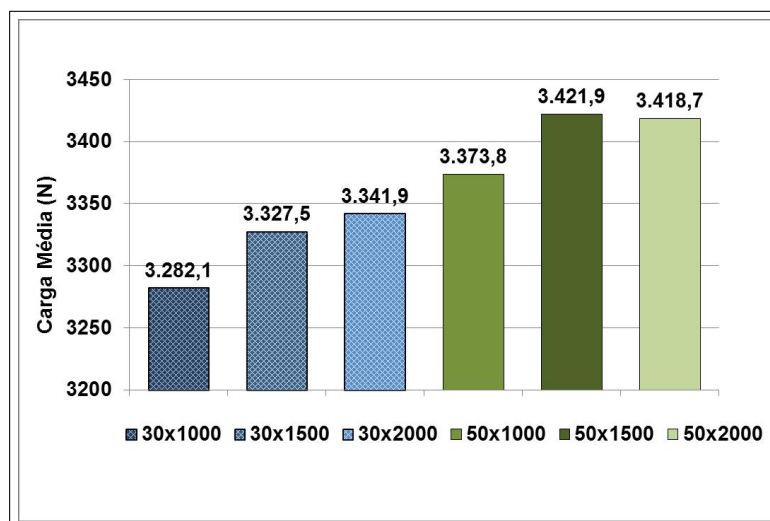
Por meio do teste F realizado para nível de confiança de 95%, constata-se que F calculado para a velocidade de avanço é maior que F crítico, portanto a velocidade de avanço é a principal responsável por mudanças na variável resposta e esta variação ocorrerá independentemente da velocidade de rotação e do efeito interação entre as variáveis.

A Figura 27 mostra as cargas médias a que foram submetidos os corpos de prova, em cada tratamento testado. Verifica-se que os valores estão muito próximos, menos de 200 N separam a menor e a maior média obtida. Este comportamento era esperado já que a análise de variância mostrou a igualdade entre as amostras.

Reconhecida a semelhança dos resultados obtidos para os tratamentos, resta verificar graficamente a interferência de cada variável no processo. Na Figura 28 está exposta a carga média em função das velocidades de avanço utilizadas no experimento. Nela é possível verificar a influência direta da velocidade de avanço na resistência da união soldada. Para as três velocidades de rotação utilizadas ocorreu aumento na carga suportada pelo corpo de prova.

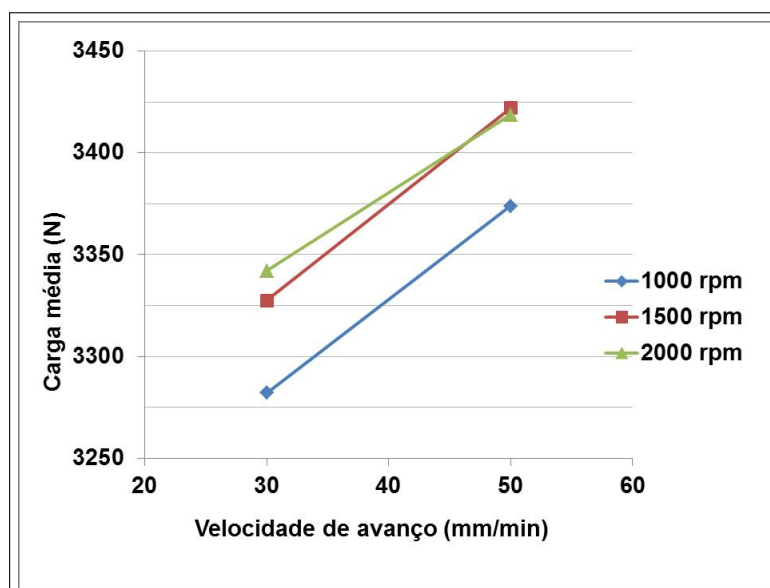
A influência da velocidade de rotação é mostrada na Figura 29, nela verifica-se que a velocidade de rotação não está diretamente ligada a resistência obtida na união. Ainda na Figura 29, a velocidade de soldagem 50 mm/min apresentou comportamento semelhante. No intervalo entre 1000 e 1500 rpm há aumento de resistência da união,

Figura 27 – Carga média dos corpos de prova



Fonte: Acervo do autor

Figura 28 – Carga média em função da velocidade de avanço

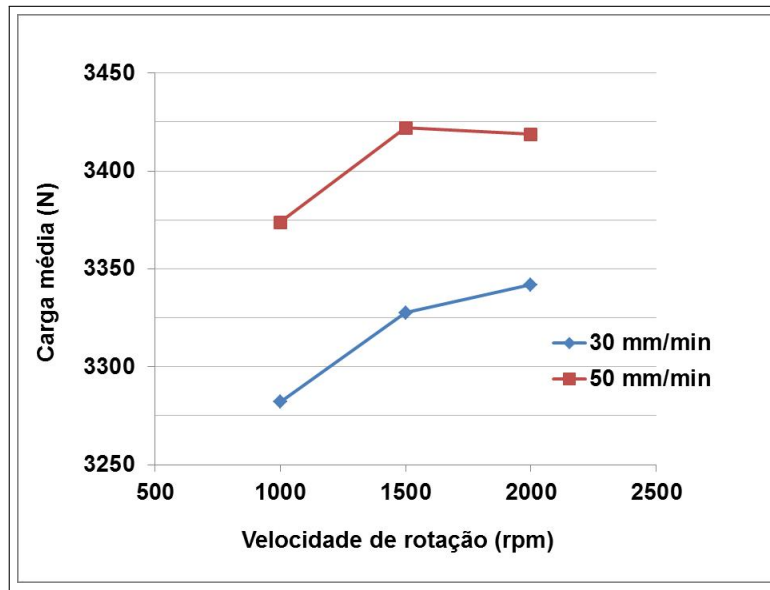


Fonte: Acervo do autor

mas no trecho seguinte ocorre pequena queda. Isso indica que velocidades de rotações próximas a 1500 rpm sejam as mais adequadas para a liga AA6060-T6 na espessura estudada.

Os corpos de prova que utilizaram 30 mm/min na velocidade de soldagem, revelaram aumento progressivo na resistência em função da rotação implementada. Entretanto o intervalo de 1000 a 1500 rpm apresenta maior acréscimo em relação ao trecho seguinte. Provavelmente o fenômeno está vinculado a diminuição do coeficiente

Figura 29 – Carga média em função da velocidade rotação



Fonte: Acervo do autor

de atrito, proveniente do maior aporte térmico na rotação de 2000 rpm.

Segundo o certificado do material, fornecido pela empresa Irmãos Galeazi Ltda, a liga de alumínio 6060-T5 apresenta limite de resistência a tração e ao escoamento de aproximadamente 147 MPa e 108 MPa respectivamente.

A eficiência de uma união é medida pela razão entre o limite de resistência dos corpos de prova soldados e o limite do material base. Saber a eficiência de uma união soldada é um dos passos necessários para avaliar os parâmetros adotados no processo.

Tabela 11 – Eficiência da união

Soldagem	Carga (N)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)	Eficiência
30/1000	3282,1	27,5	119,37	0,8
30/1500	3327,5	27,5	120,99	0,81
30/2000	3341,9	27,5	121,51	0,81
50/1000	3373,8	27,5	122,67	0,82
50/1500	3421,9	27,5	124,42	0,83
50/2000	3418,7	27,5	124,3	0,83

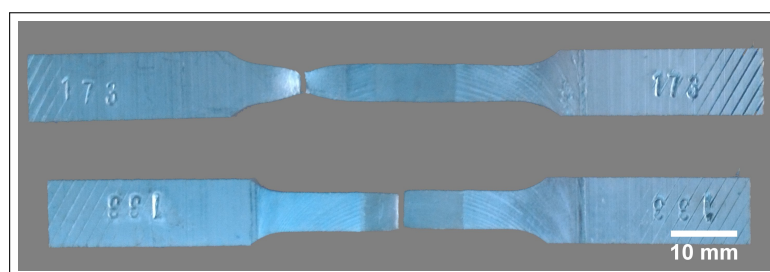
Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando as cargas médias de cada tratamento, mostrada na [Figura 27](#) e o limite de resistência a tração informado no certificado do material base ([Tabela 5](#)), obtém-se o valor de 83% para a maior eficiência obtida. Medida abaixo do esperado,

o que indica excessivo aporte de calor no processo de soldagem, degradando assim as propriedades mecânicas adquiridas no tratamento térmico da liga de alumínio, por meio da dissolução e coalescimento dos precipitados na região próxima a soldagem.

Ensaando os corpos de prova constatou-se dois tipos de falhas. Em ampla maioria dos ensaios realizados, o cordão de solda mantinha-se intacto, e a falha ocorria de maneira dúctil no material base. Em apenas dois dos 72 ensaios ocorreu comportamento diferente do mencionado, nesses corpos de prova, a falha ocorria na solda de maneira súbita sem a existência de estrição do material, conforme mostra a [Figura 30](#).

Figura 30 – Tipos de falhas apresentadas nos ensaios de tração



Fonte: Acervo do autor

Os corpos de prova romperam fora do cordão de solda, por ser esta a região afetada exclusivamente pelo aporte térmico a ZTA, nessa zona ocorre aumento no tamanho do grão e diminuição da microdureza e resistência mecânica. Já os corpos de prova que romperam sobre a união, provavelmente foram afetados por algum defeito, cavidade, que passou despercebida na análise preliminar. Desta forma, esse possível defeito atuou como concentrador de tensões, mudando o comportamento do material para frágil.

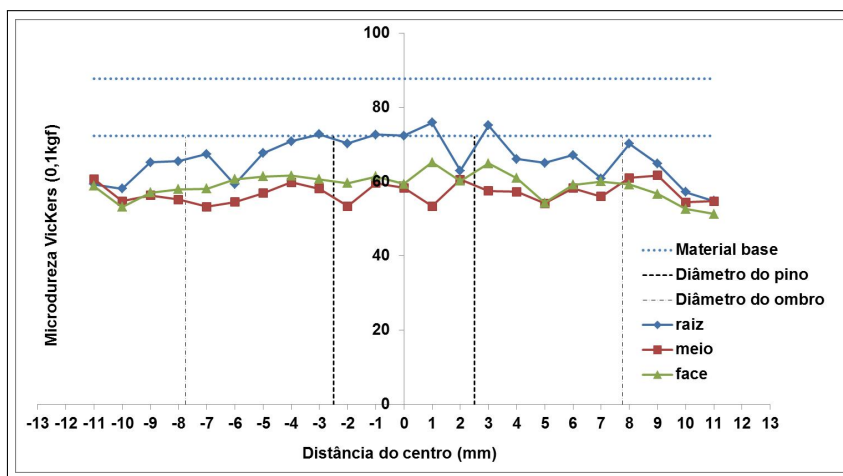
4.3 Perfis de microdureza

Da [Figura 31](#) até a [Figura 36](#) são apresentado os gráficos dos perfis médios de microdureza em três posições, raiz, meio e face. Para comparação, ainda contemplam o intervalo de microdureza do material base, assim como as principais dimensões da ferramenta, diâmetro maior do pino e do ombro.

Os experimentos realizados a velocidade de avanço de 30 mm/min e 1000 rpm apresentaram perfis médios de microdureza conforme mostra a [Figura 31](#). Nela é

possível observar que as regiões próximas ao ombro da ferramenta, representadas pelos perfis de face e meio obtiveram resultados inferiores se comparados ao perfil de raiz. Este fato é ainda mais visível se a região de análise for próxima ao diâmetro do pino. Isso pode ser justificado devido a taxa de resfriamento mais elevada, na região de contato com o suporte de fixação. Analisando somente o perfil raiz, verifica-se que a microdureza entra em declínio acentuado a medida que afasta-se da região de mistura, indicando a influência dos efeitos térmicos na região.

Figura 31 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 1000 rpm



Fonte: Acervo do autor

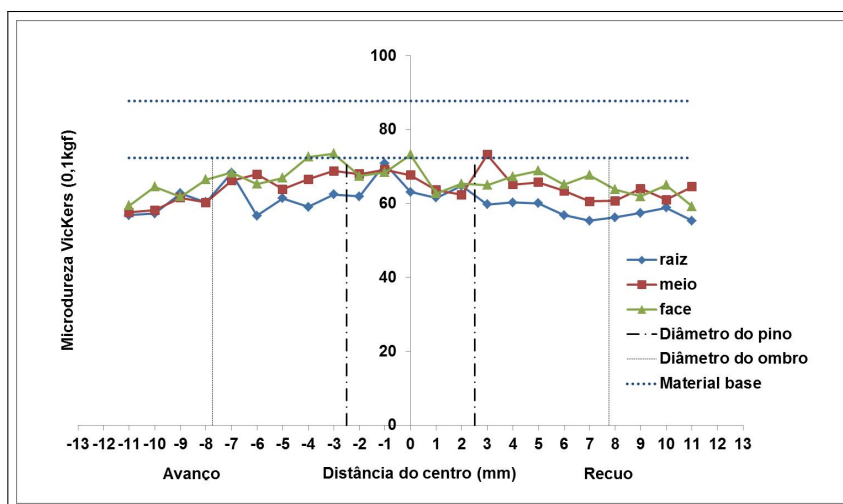
A Figura 31 ainda mostra a regularidade nas medidas de microdureza obtida nos perfis face e meio. O perfil face apresentou microdureza média na região da largura do pino de $61,3 \pm 2,8$ HV enquanto o perfil meio apontou média $57,3 \pm 2,4$ HV, ambos a baixo dos valores para da raiz, $71,7 \pm 4,3$ HV.

As amostras submetidas a soldagem com os níveis de 30 mm/min na velocidade de avanço e 1500 rpm apresentaram os perfis médios de microdureza mostrados na Figura 32, para três curvas, raiz, meio e face.

Para a combinação de parâmetros abordada na Figura 32 as médias de microdurezas mostraram-se semelhantes nas três regiões estudadas. Diferentemente da Figura 31, o perfil raiz apresentou os valores inferiores de microdureza, $63,5 \pm 3,6$ HV para a média e desvio padrão na zona de mistura. Os perfis de face e meio apresentaram microdurezas médias de $67,9 \pm 4,1$ HV e $67,6 \pm 3,6$ HV respectivamente. Supostamente a velocidade de rotação de 1500 rpm gera um maior aporte de energia térmica, dessa forma as três regiões estudadas apresentaram redução de microdureza

de maneira semelhante.

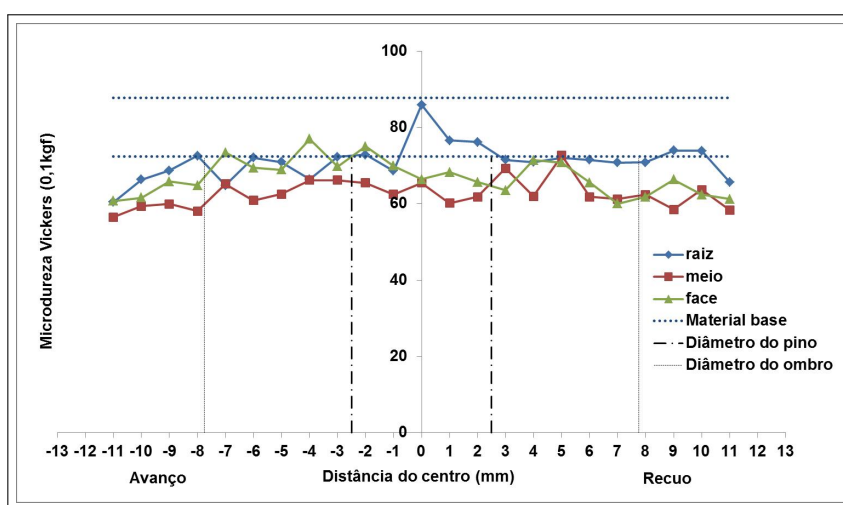
Figura 32 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 1500 rpm



Fonte: Acervo do autor

Os perfis médios de microdureza obtidos das soldagens com 30 mm/min na velocidade de avanço e 2000 rpm são apresentados na [Figura 33](#). Nela observa-se novamente o fato do perfil raiz apresentar microdureza elevada comparada aos demais perfis, estando praticamente sobre o limite inferior de microdureza do material de base, ao longo do diâmetro do ombro da ferramenta.

Figura 33 – Perfis médios de microdureza para 30 mm/min e 2000 rpm



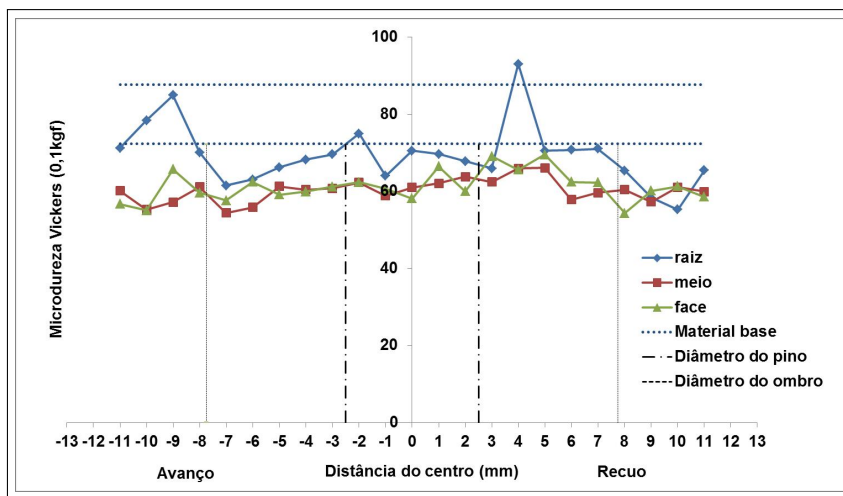
Fonte: Acervo do autor

A zona de mistura no perfil raiz apresentou a maior média de microdureza, $74,9 \pm 5,6$ HV, enquanto que a mesma região no perfil face alcançou 68,4 HV e desvio

3,7. Já no perfil meio foram obtidas as menores medidas, 64,4 HV e 3,1 para a média e desvio padrão nesta ordem.

Soldagens em que as velocidades de avanço adotadas foram 50 mm/min e de rotação 1000 rpm, produziram perfis médio de microdureza de acordo com a [Figura 34](#). Nessas soldagens o valor mais elevado de microdureza para a zona de mistura, encontra-se próximo a raiz da junta. A média neste trecho da união é 68,9 HV, contra 61,6 HV e 62,6 HV nos perfis meio e face, nesta ordem.

Figura 34 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 1000 rpm



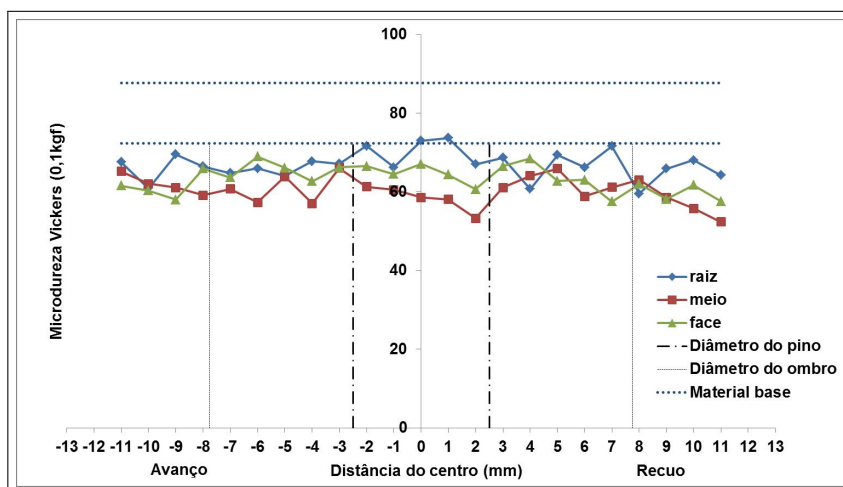
Fonte: Acervo do autor

Da mesma forma como ocorreu na velocidade de avanço inferior, [Figura 31](#), utilizando 1000 rpm a microdureza na raiz, próximo a zona de mistura tornou-se mais elevada, mas com queda significativa a medida que avança-se a zona termicamente afetada.

Os ensaios de tração indicaram quais níveis dos parâmetros fornecem a maior resistência mecânica na união. Nessa questão, a aplicação de 1500 rpm associada a 50 mm/min na velocidade de avanço gerou a união de maior qualidade. Para relacionar os resultados dos ensaios de tração e microdureza, a [Figura 35](#) apresenta os perfis obtidos das amostras soldadas com esses parâmetros.

Novamente o perfil raiz apresentou a maior microdureza, com média de 69,6 HV e desvio de 3,1 na região de mistura. Seguido do perfil face com 65,2 HV e 2,2 para média e desvio padrão amostral. O perfil meio apresentou a menor microdureza, com média de 59,8 HV e desvio de 3,9.

Figura 35 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 1500 rpm



Fonte: Acervo do autor

Os perfis da [Figura 35](#) não diferem-se significativamente dos vistos anteriormente, o perfil raiz apresentou a maior microdureza ao centro, com leve decréscimo na direção da zona termicamente afetada. Enquanto os demais perfis apresentam leve redução na microdureza na região central, tendo seu ápice mais distante do centro da união.

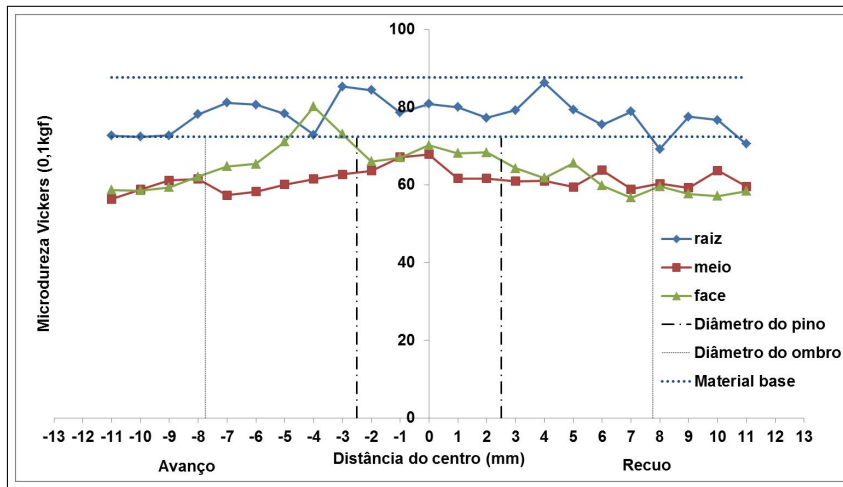
As soldagens realizadas nos níveis acima em ambos parâmetros, produziram os perfis de microdureza mais elevados, como pode ser visto na [Figura 36](#). A microdureza no perfil raiz manteve-se dentro do intervalo referente ao material base, na região de mistura apresentou média 80,8 HV e desvio padrão 3,0. O perfil face apresentou média 68,1 HV e desvio padrão 2,9 HV na região de mistura, enquanto o perfil meio obteve 63,6 HV de média na região com desvio padrão 2,8.

A [Figura 37](#) faz comparação entre as média obtidas na zona de mistura para os três perfis de medições. Para facilitar a análise, os dados utilizados são aqueles compreendidos no intervalo de -3 mm até 3 mm em relação ao centro da junta.

Fica perceptível a semelhança do comportamento da microdureza na região próxima ao pino. Em cinco das seis combinações abordadas, a microdureza da raiz e da face mostraram-se mais elevadas em relação ao perfil localizado no meio da amostra.

O fato da raiz da junta apresentar microdureza mais elevada, está atrelada a maior taxa de resfriamento dessa região devido ao contato com suporte de fixação das

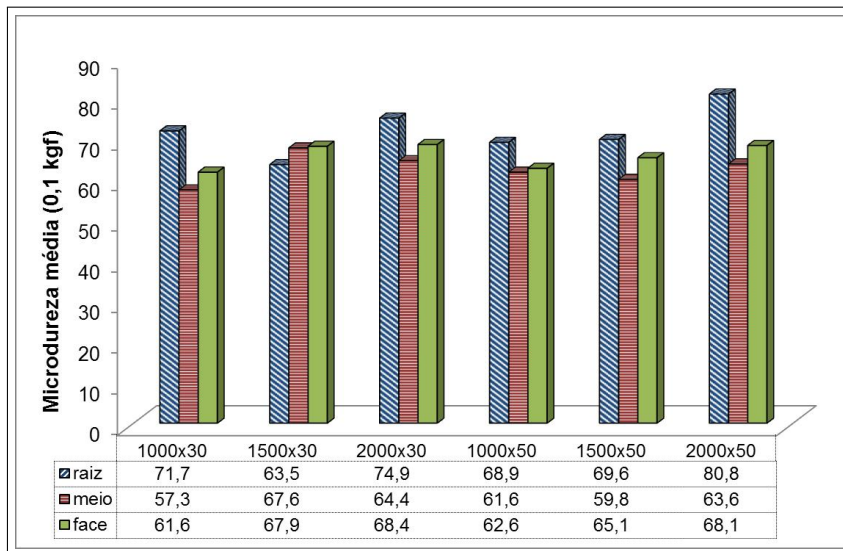
Figura 36 – Perfis médios de microdureza para 50 mm/min e 2000 rpm



Fonte: Acervo do autor

chapas. Ao passo que a região próxima a face das chapas apresenta maior revolvimento de material, devido ao contato direto com o ombro facilitando os mecanismos de refinamento da microestrutura, como a recristalização dinâmica.

Figura 37 – Microdureza média na zona de mistura

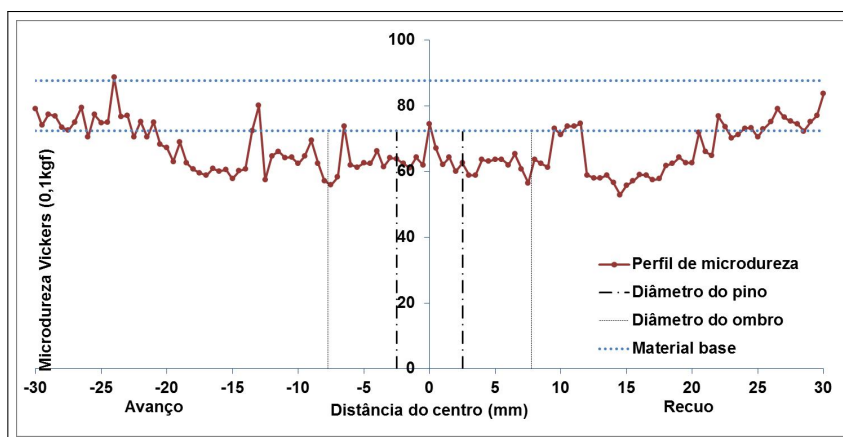


Fonte: Acervo do autor

Como os perfis de microdureza mostrados (Figura 31 até a Figura 36) não ilustram a transição entre a zona de mistura até o material base devidamente. Um novo perfil de medidas foi realizado, desta vez com a extensão de 30 mm em relação a linha de junta. As medições foram realizadas em uma amostra da combinação 1500 rpm e 50 mm/min a exatos 2 mm da face inferior das chapas, coincidente então com o perfil

meio, mas com espaçamento de 0,5 mm entre medições.

Figura 38 – Perfil de microdureza transversal de maior extensão



Fonte: Acervo do autor

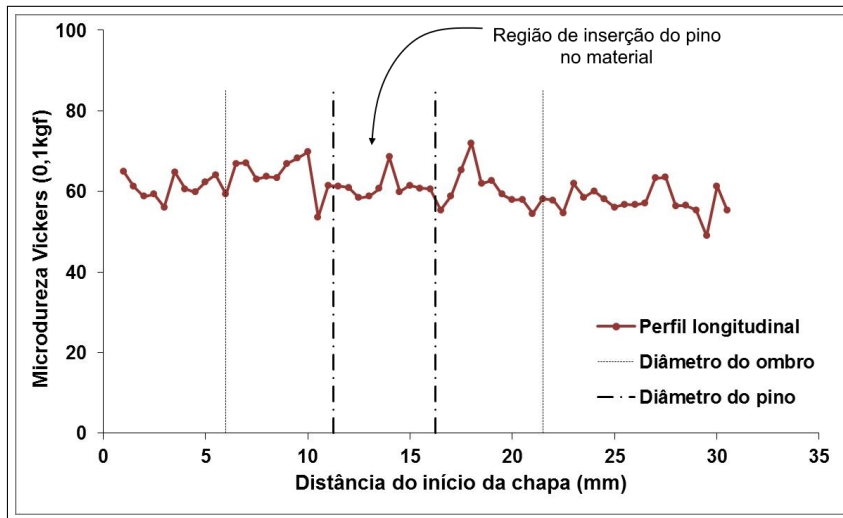
Como mostra a [Figura 38](#), não há aumento significativo da microdureza na zona de mistura, comparada a suas adjacências. Explicado pelo excesso de calor causado pela combinação de baixa velocidade de avanço e elevada rotação. A microdureza média ao longo do diâmetro do ombro é $62,7 \pm 3,9$ HV e os menores valores foram observados a 15 mm do centro da união, nas regiões próximas aos raios de concordâncias dos corpos de prova de tração ([Figura 23](#)).

Para complementar a avaliação da microdureza na soldagem, buscando identificar comportamento distinto no aporte de calor e no fluxo de material foram realizados perfis na secção longitudinal próxima a entrada e saída da ferramenta. Nessa abordagem foram utilizadas amostras provenientes do mesmo cordão, soldado a 1500 rpm e 50 mm/min.

Na [Figura 39](#) estão expostos os dados coletados na região de entrada da ferramenta. O intervalo de zero a 6 mm corresponde a região anterior ao cordão de solda, já o trecho após 21 mm é o cordão em si. Entre essas duas regiões está a zona atingida pela entrada do pino nas chapas, no início da soldagem.

É possível verificar que a região perfurada pelo pino, não apresentou queda considerável na microdureza, comparada a região não soldada e o restante do cordão. Entretanto apresentou mudança de comportamento na periferia do pino, causada pelo excessiva deformação no local. Ainda pode-se mencionar a semelhança entre o perfil de microdureza mostrado na [Figura 39](#) e um perfil transversal clássico do processo

Figura 39 – Microdureza longitudinal na região de entrada da ferramenta

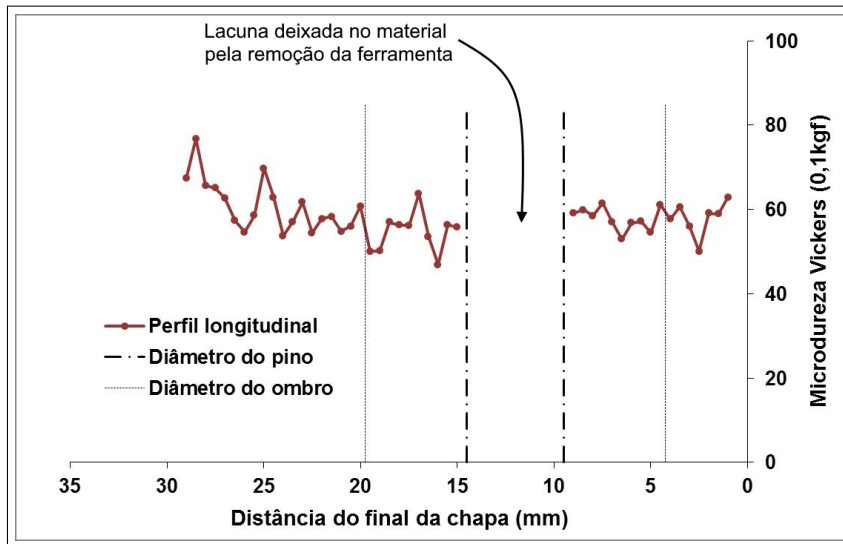


Fonte: Acervo do autor

friction stir welding.

A Figura 40 expõe as medições realizadas na seção longitudinal de saída da ferramenta. A lacuna no perfil entre 9 mm e 14 mm é deixada no material ao retirar a ferramenta, as regiões adjacentes estão em contato com o ombro da ferramenta.

Figura 40 – Microdureza longitudinal na região de saída da ferramenta



Fonte: Acervo do autor

Já a região de zero a 4 mm é o material base não soldado, e a região a partir de 20 mm é o cordão de solda. A região de saída, compreendida por toda a extensão do diâmetro da ferramenta, apresentou média $56,5 \pm 2,6$ HV contra $62,1 \pm 4,5$ HV na região de entrada. Comparando ambas, a microdureza obtida na seção transversal

(Figura 38) de $62,7 \pm 3,9$ HV concluí-se que o comportamento térmico e condições do escoamento são semelhantes, tanto na região de entrada, saída e ao longo do cordão.

4.4 Macrografia da seção transversal

A realização das macrografias é necessária para verificar as condições metalúrgicas da união, as características do fluxo de material e a presença de defeitos macrográficos como vazios e penetração insuficiente.

Na Figura 41 encontra-se a macrografia obtida de uma amostra soldada a 30 mm/min e 1000 rpm nas velocidades de avanço e rotação respectivamente. Nela é possível observar os limites de cada zona metalúrgica formada no processo de soldagem, bem como a semelhança entre lado de recuo e avanço. Não foram constatados defeitos relacionados ao fluxo de material e a geometria da ferramenta.

Figura 41 – Macrografia de amostra soldada a 1000 rpm e 30 mm/min



Fonte: Acervo do autor

A Figura 42 contém a macrografia realizada em soldagem a 1500 rpm e os mesmos 30 mm/min da figura anterior. Novamente não foram constatados defeitos relacionados ao fluxo de material e a geometria da ferramenta. Além disso verifica-se transição suave da zona de mistura da face inferior da chapa até a superior.

Figura 42 – Macrografia de amostra soldada a 1500 rpm e 30 mm/min

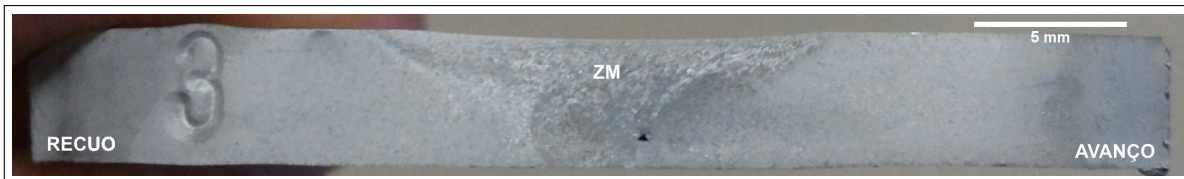


Fonte: Acervo do autor

Divergindo na aparência das macrografias anteriores, a Figura 43 mostra a soldagem realizada a 2000 rpm. Nota-se claramente o formato da zona de mistura

distinto das demais soldagens realizadas com velocidade de avanço de 30 mm/min. A mudança abrupta no formato da zona de mistura indica fluxo de material inapropriado, visto que há a presença de uma cavidade na interface entre zona de mistura e ZTMA. Pode-se verificar a relação entre o fluxo inapropriado que gerou esta cavidade, e o aumento de resistência pouco significativo para 2000 rpm mostrado na [Figura 29](#).

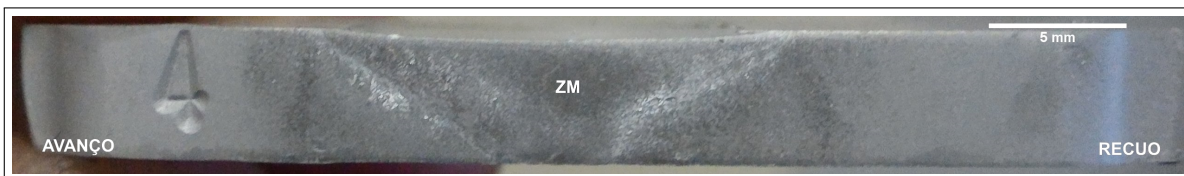
Figura 43 – Macrografia de amostra soldada a 2000 rpm e 30 mm/min



Fonte: Acervo do autor

A [Figura 44](#) revela a macrografia obtida com 50 mm/min na velocidade de avanço e 1000 rpm. Novamente não constatou-se defeitos relacionados ao fluxo de material ou a geometria da ferramenta. O desenvolvimento da zona de mistura ocorre de maneira suave da face superior até a inferior da chapa.

Figura 44 – Macrografia de amostra soldada a 1000 rpm e 50 mm/min



Fonte: Acervo do autor

Abaixo na [Figura 45](#) está a amostra soldada com respectivos parâmetros, 1500 rpm e 50 mm/min. Com esta combinação não foram detectados vazios, cavidades, defeitos de túnel ou falta de penetração da ferramenta. Isso indica que o fluxo de material ocorreu de maneira satisfatória.

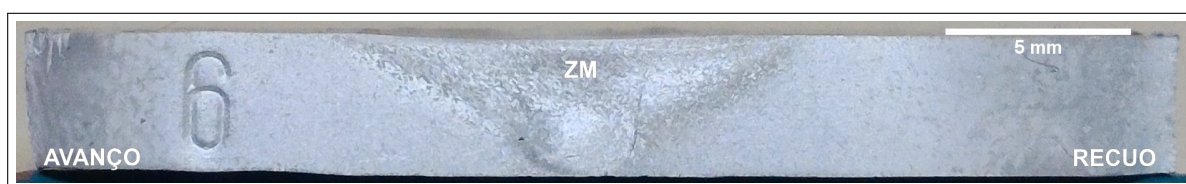
Figura 45 – Macrografia de amostra soldada a 1500 rpm e 50 mm/min



Fonte: Acervo do autor

Na [Figura 46](#) está exposta a macrografia obtida de amostra soldada a 2000 rpm e 50 mm/min. Nela é possível observar pequena cavidade no lado de avanço, semelhante ao ocorrido para mesma velocidade de rotação mas velocidade de avanço inferior. Isso reafirma a condição mostrada na [Figura 29](#), que o aumento excessivo na velocidade de rotação não produz resultados satisfatórios. Com o aumento da velocidade de rotação há possibilidade de formação de vórtices próximos a face inferior das chapas, causando expulsão do material em direção a face superior.

Figura 46 – Macrografia de amostra soldada a 2000 rpm e 50 mm/min



Fonte: Acervo do autor

Dessa forma é possível concluir que a velocidade de rotação adequada para a realização de soldagens na liga de alumínio 6060-T5 não deve aproximar-se de 2000 rpm, visto que as macrografias realizadas para este parâmetro apresentaram vazios internos nos dois níveis de velocidade de avanço e não colaboraram significativamente para aumento de resistência, mostrada na [Figura 29](#).

4.5 Discussão dos resultados

Em trabalho similar [Giraud et al. \(2016\)](#) produziu juntas na configuração topo entre as ligas AA6060-T6 e AA7020-T651 e alcançou valores para eficiência da junta no intervalo de 62% a 76% em relação a liga AA6060-T6. Se comparado os resultados obtidos nessa pesquisa, eficiência entre 80% e 83% é possível afirmar que os resultados foram satisfatórios.

[Sun, Tsuji e Fujii \(2016\)](#) obteve eficiência máxima de 55% na união das ligas 1050 de granulometria ultra-fina e a liga 6061-T6. Considerando a diferença significativa entre as propriedades das ligas abordadas nesse estudo, ainda assim é possível traçar um paralelo com o estudo realizado teve ótimos resultados, com eficiência na casa dos 80%.

Na pesquisa realizada por ([GHARAIBEH; AL-JARRAH; SAWALHA, 2016](#)) sol-

dando a liga AA6061, onde foram testados diversas geometrias de pinos, a eficiência obtida esteve em torno de 65%. Também muito inferiores aos obtidos nessa pesquisa.

No trabalho de (KÜÇÜKREDECI, 2015) a liga soldada foi a AA6060, o mesmo abordou a influência da velocidade de rotação e a velocidade de soldagem nas propriedades mecânicas da união. A eficiência obtida para os parâmetros adotados nesse estudo foi 60%.

Comparando os resultados obtidos, com outras quatro pesquisas verifica-se que a janela de parâmetros adota nesse estudo produziu excelentes resultados, uma vez que a eficiência mínima atingida foi 80%.

5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi a adaptação de um centro de usinagem ao processo *friction stir welding*, desta forma realizar a soldagem da liga de alumínio 6060-T5 na espessura de 4,75 mm e posterior análise quantitativa e qualitativa da união produzida.

Com base na metodologia aplicada nos experimentos e os resultados obtidos, as seguintes conclusões a cerca desta pesquisa podem ser apontadas:

- a) A realização do método FSW propiciou a obtenção de uniões satisfatórias, visto que defeitos não ocorreram de maneira recorrente e dessa forma, foi possível atingir resistências mecânicas de até 83% do limite de tração do material base;
- b) A geometria e fabricação da ferramenta utilizada nas soldagens mostrou-se adequada, pois não aconteceram quebras de ferramenta e apenas uma das seis ferramentas fabricadas foi utilizada;
- c) O ângulo de inclinação de $3,1^\circ$ mostrou-se satisfatório por não apresentar defeitos de acabamento superficial, comuns quando o ângulo escolhido é insuficiente. Além do que, as soldas não apresentaram concavidade excessiva, fato corriqueiro quando ângulo de inclinação é elevado;
- d) Ficou evidenciada a relação entre resistência mecânica e a velocidade de avanço. Para a velocidade de avanço de 50 mm/min ocorreu aumento de resistência comparado a velocidade de 30 mm/min, independente da rotação utilizada;
- e) A rotação não apresentou relação direta com a resistência da união no intervalo abordado e a utilização de 2000 rpm mostrou-se inadequada, pois não contribuiu para aumento de resistência mecânica e produziu cavidades internas para ambas velocidades de soldagem. Sendo assim, 1500 rpm mostra-se mais adequada a condição estudada.

5.1 Trabalhos futuros

A pesquisa realizada não pode ser admitida como completa e finalizada devido as grande complexidade da área, além disso, as dificuldades encontradas no decorrer do trabalho e a experiência adquirida no mesmo faz surgir as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- a) Adaptação de instrumentos de controle, como células de carga para acompanhamento dos esforços gerados no processo e termopares para verificação da história térmica da união soldada;
- b) Utilizar ferramentas com geometria mais complexa, com a base do ombro concava por exemplo, na tentativa de reduzir a formação de rebarbas e para melhorar o fluxo de material;
- c) Utilizar métodos de avaliação da união não abordados nesta pesquisa, como ensaio de dobramento para verificar a perda de ductibilidade na união causada por cavidades presentes, microscopia ótica e de varredura para verificar o comportamento do material, principalmente na interface ZTA/ZTMA onde ocorrem defeitos frequentes.

Referências

- ALCAN, A. d. B. S. Manual de soldagem. *ALCAN Alumínio do Brasil*, 1993.
- ALMEIDA, D. T. d. *Estudo dos Parâmetros no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (fsw) da Liga de Alumínio 5083-O*. Panambi: [s.n.], 2013. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Graduação.
- ARBEGAST, W. Hot deformation of aluminum alloys iii, tms. *Warrendale, Pa*, p. 313–27, 2003.
- ARBEGAST, W. J. A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta materialia*, Elsevier, v. 58, n. 5, p. 372–376, 2008.
- BUFFA, G. et al. Design of the friction stir welding tool using the continuum based fem model. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 419, n. 1, p. 381–388, 2006.
- CAPELARI, T. V. *Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA5052*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CERVEIRA, R. L. L. P. *Caracterização experimental do comportamento mecânico sob solitação multiaxial em junções de chapas AA2024-T3 soldadas por fricção-mistura ('FSW')*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.
- CHEN, H.-B. et al. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 433, n. 1, p. 64–69, 2006.
- COLEGROVE, P. A.; SHERCLIFF, H. R. 3-dimensional cfd modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 169, n. 2, p. 320–327, 2005.
- DAVIS, J. R. *ASM handbook. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. [S.l.]: ASM International, 2009.
- DEFALCO, J. Friction stir welding vs. fusion welding. *Welding journal*, American Welding Society, v. 85, n. 3, p. 42–44, 2006.
- ESAB. *Welding and Cutting Products AB. Products*. 2016. Online; acessado em 28 out 2016. Disponível em: <<http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?fuseaction=home.category&categoryId=7>>.
- FIORAVANTI, A. S. *Soldagem por FSW de Ligas de Alumínio Alcalad AA2024-T3 e AA7075-T6*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- FONDA, R.; BINGERT, J.; COLLIGAN, K. Development of grain structure during friction stir welding. *Scripta Materialia*, Elsevier, v. 51, n. 3, p. 243–248, 2004.

FULLER, C. B. Friction stir tooling: tool materials and designs. *Friction stir welding and processing*, ASM International, Materials Park, p. 7–36, 2007.

GHARAIBEH, N.; AL-JARRAH, J. A.; SAWALHA, S. A. Effect of pin profile on mechanical properties of 6061 al alloy welded joints prepared by friction stir welding. *International Journal of Mechanics and Applications*, Scientific & Academic Publishing, v. 6, n. 3, p. 39–42, 2016.

GIBSON, B. et al. Friction stir welding: process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 56–73, 2014.

GIPIELA, M. L. Influência dos parâmetros de processo na soldagem da liga de alumínio aa5052-o pelo processo fsw. In: *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF*. Salvador, Bahia: [s.n.], 2015.

GIRAUD, L. et al. Investigation into the dissimilar friction stir welding of aa7020-t651 and aa6060-t6. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 235, p. 220–230, 2016.

GOPI, S.; MANONMANI, K. Influence of shoulder profile and shoulder penetration on joint strength; of friction stir welded aa6082 in conventional milling machine. *European Journal of Scientific Research*, v. 73, n. 1, p. 20–32, 2012.

HILLER, D. J. *Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

ILANGOVAN, M.; BOOPATHY, S. R.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar aa 6061–aa 5086 aluminium alloy joints. *Defence Technology*, Elsevier, v. 11, n. 2, p. 174–184, 2015.

JAMES, M. et al. The relationship between process mechanisms and crack paths in friction stir welded 5083-h321 and 5383-h321 aluminium alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Wiley Online Library, v. 28, n. 1-2, p. 245–256, 2005.

KHALED, T. An outsider looks at friction stir welding. *Fed Aviat Admin*, v. 25, p. 27–29, 2005.

KIM, Y. et al. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 415, n. 1, p. 250–254, 2006.

KÜÇÜKRENDECI, I. Mechanical and microstructural properties of en aw-6060 aluminum alloy joints produced by friction stir welding. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, v. 63, n. 2, p. 475–478, 2015.

LEONARD, A.; LOCKYER, S. Flaws in friction stir welds. In: PARK CITY, UTAH, USA. *4th International Symposium on Friction Stir Welding*. [S.l.], 2003. v. 16.

LI, X.-w. et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 1298–1306, 2012.

LOPEZ, E. A. T. *Soldagem por Atrito com Pino não Consumível de Chapas Finas do aço 1020 e a liga de Alumínio 6063-T5*. Tese (Doutorado) — Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MARCONATO, E. A. *Influência de defeitos nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por FSW da liga AA6013-T6*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Mecânica e de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 1–78, 2005.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADSHIA, H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.

OLSON, D. L. *ASM handbook: welding, brazing, and soldering*. [S.l.]: Asm Intl, 1993. v. 6.

OOSTERKAMP, A.; OOSTERKAMP, L. D.; NORDEIDE, A. Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, v. 83, n. 8, p. 225–S, 2004.

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

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 164, p. 1106–1112, 2005.

RODRIGUEZ, R. et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of 6061-to-7050 aluminum alloys. *Mater Des*, v. 83, p. 60–65, 2015.

SACCON, V. T. *Investigação microestrutural e estudo das propriedades mecânicas da liga de alumínio AA3139 T3 e T8 soldadas por Friction Stir Welding - FSW*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Mecânica e de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SANTOS, J. dos et al. Metallurgy and weld performance in friction stir welding. In: *Friction stir welding: From basics to applications*. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited incorporating Chandos Publishing, 2009. p. 1–436.

SHEN, Z. et al. Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 270–277, 2015.

SOKI, C. A. *Study of Contact Tolerance for Aluminium Sheets A2024-T3 Welded by Friction Stir Welding*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

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

SUN, Y.; TSUJI, N.; FUJII, H. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding between ultrafine grained 1050 and 6061-t6 aluminum alloys. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 10, p. 249, 2016.

THOMAS, W. et al. *Friction welding*. Google Patents, 1995. US Patent 5,460,317. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US5460317>>.

THREADGILL, P. L. Friction stir welding—the state of the art. *Bulletin*, v. 678, 1999.

ZETTLER, R. et al. Effect of tool geometry and process parameters on material flow in fsw of an aa 2024-t351 alloy. *Welding in the World*, Springer, v. 49, n. 3-4, p. 41–46, 2005.

Apêndices

APÊNDICE A – Têmperas em alumínio

A [Tabela 12](#) mostra os tipos de têmperas que podem ser empregados em determinadas ligas de alumínio.

Tabela 12 – Procedimento das têmperas de alumínio

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

Fonte: Elaborado a partir de [Alcan \(1993\)](#)

APÊNDICE B – Parâmetros utilizados nas referências

A [Tabela 13](#) exibe os autores utilizados como referência para os parâmetros adotados nos experimentos, nela pode-se comparar o material utilizado bem como sua espessura e parâmetros da soldagem.

Como é possível observar não consenso sobre os parâmetros de soldagem e as geometrias de ferramentas. Geralmente ocorrem muitas particularidades, analisando diversos estudos. A mais frequente é a adaptação do processo para a sua execução em centros de usinagem CNC.

Tabela 13 – Parâmetros de soldagem na configuração topo em alumínio

Pesquisador	Material	Espessura (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
Gharaibeh, Al-Jarrah e Sawalha (2016)	6061	6	1120	90
Sun, Tsuji e Fujii (2016)	UFG-1050/6061-T6	2	800	600
Giraud et al. (2016)	7020-T651/6060-T6	5	1000	700
Gipiela (2015)	5052-O	5	250	112
Ilangovan, Boopathy e Balasubramanian (2015)	6061/5086	6	1100	22
Rodriguez et al. (2015)	6061-T6/7050-T7451	5	410	114
Almeida (2013)	5083-O	6,35	500	45
Gopi e Manonmani (2012)	6082	4	1300	192
Saccon (2011)	2139-T8	3,5	1800	1000
	2139-T3	3,5	600	250
Souza (2010)	5052-F	6,35	1000	112
Marconato (2009)	6013-T6	3,00	900	1200
Paiva (2009)	6063-T6	3,00	1120	318
	7075-T6	1,8	1250	10
Fioravanti (2008)	7075-T6/2423-T3	1,8	1250	10
	2423-T3	1,8	1250	10
Capelari (2006)	5052-H34	6,35	1000	75

Fonte: Elaborado pelo autor

A [Tabela 14](#) compara os dimensões das ferramentas adotadas pelos pesquisa-

dores nos seus experimentos.

A não utilização de equipamentos específicos para a soldagem torna a avaliação limitada, uma vez que certos níveis de parâmetros não poderão ser alcançados. Outrora serão atingidos os níveis pretendidos, mas sem a segurança da integridade dos equipamentos e ferramentas.

Tabela 14 – Dimensões das ferramentas na soldagem topo em alumínio

Pesquisador	Inclin.	Comp. pino(mm)	Diâm. ombro(mm)	Diâm. pino(mm)
Gharaibeh, Al-Jarrah e Sawalha (2016)	-	5,8	21	6
Sun, Tsuji e Fujii (2016)	3°	1,8	12	4
Giraud et al. (2016)	zero	4,8	15	-
Gipiela (2015)	2°	5,9	18	6,7
Ilangovan, Boopathy e Balasubramanian (2015)	1°	5,7	18	6
Rodriguez et al. (2015)	-	-	18	10
Almeida (2013)	3°	6	18	6,3
Gopi e Manonmani (2012)	-	-	12	4
Sacson (2011)	-	-	-	-
Souza (2010)	2°	5,9	27,9	6,4
Marconato (2009)	-	-	-	-
Paiva (2009)	zero	2,8	14	3
Fioravanti (2008)	3°	1,7	12	3
	3°	1,7	12	3
	2°	1,7	12	3
Capelari (2006)	3°	5,9	18	6

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C – Análise de variância

Na [Tabela 15](#) pode ser observado o código atribuído a cada combinação de parâmetros utilizado no processo de soldagem.

Tabela 15 – Código atribuído a combinação de parâmetros

Tratamento	Código
30x1000	T1
30x1500	T2
30x2000	T3
50x1000	T4
50x1500	T5
50x2000	T6

De acordo com o código de cada tratamento, estão dispostos na [Tabela 16](#) as cargas máxima obtidas para cada um dos 12 ensaios de tração realizados em cada combinação. Os dados dispostos como estão, foram utilizados na análise de variância fator único exposta de maneira resumida na [Tabela 9](#).

Tabela 16 – Disposição dos dados para calculo da anova fator único

T	Cargas resistidas (N)											
T1	3203	3206	3213	3643	3266	3274	3238	3219	3287	3272	3299	3265
T2	3367	3257	3208	3167	3346	3338	3389	3379	3344	3335	3403	3397
T3	3537	3445	3386	3305	3553	3438	3441	3385	3156	3149	3206	3104
T4	3545	3497	3385	3387	3447	3446	3417	3428	3408	3470	2982	3074
T5	3507	3477	3421	3443	3452	3420	3462	3430	3249	3356	3403	3443
T6	3593	3571	3329	3509	3318	3271	3236	3285	3560	3478	3535	3340

A análise de variância completa está na [Figura 48](#) obtida com auxílio do *software* Microsoft Office Excel. Além do valor de prova P, a análise pode ser feita de maneira similar através do teste F. O valor de F obtido para as amostras é inferior ao valor de F crítico, com isso deve-se aceitar a hipótese nula de igualdade entre as cargas máximas resistidas, independentemente do tratamento aplicado.

Ainda é possível observar que os tratamentos T2 e T5 apresentaram os menores desvios padrões e coeficientes de variações, ambos foram realizados a rotação de 1500

Figura 47 – Análise de variância fator único

RESUMO						
Tratamento	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	CV
T1	12	39385	3282	14011	118	3,61
T2	12	39930	3327	5845	76	2,30
T3	12	40103	3342	24026	155	4,64
T4	12	40486	3374	28543	169	5,01
T5	12	41063	3422	4406	66	1,94
T6	12	41024	3419	17834	134	3,91

ANOVA						
Fonte	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	179046	5	35809	2,27	0,058	2,35
Dentro dos grupos	1041324	66	15778			
Total	1220370,625	71				

Fonte: Acervo do autor

rpm indicando assim que está velocidade de rotação produz resultados mais coesos.

Entretanto o tratamento T2 apresentou a menor carga média resistida, enquanto o tratamento T5 apresentou a maior.

A realização da análise de variância fator duplo utilizou os dados dispostos na Tabela 16, seguindo o código da Tabela 15.

Figura 48 – Análise de variância fator duplo para a carga máxima

Anova: fator duplo com repetição					
RESUMO	1000	1500	2000	Total	
<i>Avanço 30</i>					
Contagem	12	12	12	36	
Soma	39385	39930	40103	119418	
Média	3282	3327	3342	3317	
Variância	14011	5845	24026	14461	
<i>Avanço 50</i>					
Contagem	12	12	12	36	
Soma	40486	41063	41024	122573	
Média	3374	3422	3419	3405	
Variância	28543	4406	17834	16457	
<i>Total</i>					
Contagem	24	24	24		
Soma	79871	80993	81127		
Média	3328	3375	3380		
Variância	22548	7230	21556		
ANOVA					
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Amostra	138259,99	1,00	138259,99	8,76	0,00
Colunas	39697,68	2,00	19848,84	1,26	0,29
Interações	1091,89	2,00	545,95	0,03	0,97
Dentro	1041327,44	66,00	15777,69		
Total	1220377,00	71,00			


Fonte: Acervo do autor

Anexos

ANEXO A – Certificado do material

A Figura 49 é uma cópia do certificado de especificação técnica da matéria prima 6060-T5. Adquirida para fins de pesquisa.

Figura 49 – Certificado do Alumínio

 Galeazi Sul Metais Não Ferrosos		IRMÃOS GALEAZI LTDA Rua João Brufatto, 45 - Bairro Navegantes - CEP: 90.240-380 - Porto Alegre/RS Telefone: (51) 2104.1066 - Fax: (51) 2104.1080 Site: www.galeazi.com.br - E-mail: galeazi@galeazi.com.br	
<i>Informamos que os materiais constantes em nossa nota fiscal abaixo mencionada, obedecem conforme nosso fornecedor, as seguintes normas técnicas de fabricação.</i>			
CNPJ: 92.971.845/0001-42 CÓDIGO: 212199		ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	
ESPECIFICAÇÃO Nº: 687	NFE Nº: 102115		
CLIENTE: FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT	DATA DE EMISSÃO: 31/10/2016		
NORMA CORRESPONDENTE: ASTM 6060 LIGA 6060 T5	MATERIAL: BARRA ALUM RETANG 63.50 X 4.76 MM		

PROPRIEDADES MECÂNICAS								
L. R. (kgf/mm ²)	L. E. (kgf/mm ²)		Along. (%)		Dureza H. B.		C. E. (%)	
	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.
15	-	11	-	8	-	66	-	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA													
Al	B	Be	Bi	Ca	Cr	Cu	Fe	Ga	Grafito	Li	Mg	Mn	Pb
Rest	-	-	-	-	0,050	0,100	0,300	-	-	-	0,350	0,100	-
											0,600	0,100	-

Si	Sr	Ti	V	Zn	Zr	Outros
0,300	-	-	-	-	-	-
0,600	-	0,100	-	0,100	-	-

Legenda

- L. R. Limite de Resistência
- L. E. Limite de Escoamento
- Along. Alongamento (%)
- H. B. Dureza Brinell
- C. E. Condutividade Elétrica

Porto Alegre 31/10/2016

Jorge Carvalho