

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA A LIGA DE
ALUMÍNIO 2219 SOLDADA POR SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR COM
FERRAMENTA DE OMBRO DUPLO

Juliano Lorenzon Marks

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre - RS

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Marks, Juliano Lorenzon
OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA A LIGA DE
ALUMÍNIO 2219 SOLDADA POR SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR
COM FERRAMENTA DE OMBRO DUPLO / Juliano Lorenzon
Marks. -- 2025.
64 f.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2025.

1. Solda por fricção com ferramenta de ombro
duplo. 2. Bobbin tool. 3. Otimização de parâmetros de
soldagem. 4. FSW. 5. Liga de alumínio 2219. I. Borges,
Prof. Dr. Marcelo Favaro, orient. II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais pela orientação sábia e a minha irmã pelo apoio durante toda esta jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família que esteve ao meu lado durante toda a jornada acadêmica até o presente momento.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao instituto alemão de pesquisa Helmholtz-Zentrum Hereon onde tive a oportunidade de realizar meu estágio obrigatório e bem como todo o trabalho prático e teórico contido nesta tese.

Agradeço ao Prof. Dr. Benjamin Klusemann, chefe do Departamento de Processamento de Materiais Estado Sólido (WMP) por me proporcionar a incrível oportunidade deste estágio no Helmholtz-Zentrum Hereon, na Alemanha. Agradecimento ao M.Sc. Luciano Bergmann, líder do grupo de *Friction Stir Welding*, por orientar esta pesquisa. Seus conhecimentos foram imprescindíveis para o desenvolvimento do presente estudo.

Agradecimento especial ao M.Sc. Matteo Bernardi, meu supervisor no Helmholtz-Zentrum Hereon, pelos grandes ensinamentos durante o meu estágio. Obrigado por acreditar na minha capacidade e me passar confiança para que juntos tivéssemos êxito no trabalho. Sua orientação estabeleceu uma base de conhecimento fundamental e seu companheirismo será sempre lembrado.

Agradeço a todos os meus colegas do WMP que fizeram parte da minha jornada no Helmholtz-Zentrum Hereon, especialmente: Dagmar, Menno, Francisco, Rafael, Gabriel, Camila, Marius, Lasse, Pietro, Zina, Elizabeth, Felipe Biasi, Fellipe, Leonardo, e todos os outros, expresso minha profunda apreciação. Os mesmos se tornaram minha família e foram fundamentais para que a experiência deste um ano morando e trabalhando na Alemanha fosse a melhor possível.

Agradeço a todos os professores que se empenharam em transmitir seus conhecimentos durante a graduação.

Agradeço também aos colegas de curso pelas contribuições técnicas e companheirismo ao longo destes anos de aprendizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
1.0 INTRODUÇÃO.....	01
2.0 OBJETIVOS.....	04
2.1 Objetivos gerais.....	04
2.2 Objetivos específicos.....	04
3.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	05
3.1 Cenário da indústria aeroespacial.....	05
3.2 Alumínio e ligas de alumínio.....	06
3.2.1 Liga de alumínio 2219.....	07
3.2.2 Tratamento Térmico T81 para a liga de alumínio 2219.....	10
3.3 Solda por fricção (FSW).....	13
3.3.1 Solda por fricção do tipo Bobbin Tool (BT-FSW).....	14
3.4 Parâmetros de processo.....	15
3.4.1 Microestrutura das juntas soldadas por BT-FSW.....	17
3.5 Trabalhos anteriores.....	18
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1 Material.....	20
4.2 Procedimento de soldagem.....	21
4.2.1 Otimização de Parâmetros.....	23
4.2.2 Envelhecimento Natural.....	24
4.3 Caracterização Metalográfica.....	24

4.3.1	Preparo das Amostras.....	25
4.3.2	Análise Microscópica.....	26
4.3.3	Análise Topográfica.....	26
4.3.4	Análise por difração de Raio-X.....	27
4.4	Caracterização mecânica.....	27
4.4.1	Mapa de dureza.....	27
4.4.2	Ensaio de tração.....	27
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1	Efeito dos parâmetros de processo nas juntas soldadas por BT-FSW.....	29
5.2	Características microestruturais da técnica BT-FSW.....	34
5.3	Fluxo de material característico da técnica BT-FSW.....	36
5.4	Propriedades mecânicas das amostras soldadas por BT-FSW.....	37
5.5	Acabamento superficial das amostras soldadas por BT-FSW.....	41
6.0	CONCLUSÕES.....	42
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
8.0	REFERÊNCIAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 –	Diagrama de fases Alumínio – Cobre.....	08
Figura 3.2 –	Micrografias de transmissão eletrônica mostrando a estrutura da liga 2219 em diferentes condições.....	11
Figura 3.3 –	Representação da ferramenta.....	15
Figura 3.4 –	Parâmetros de processo.....	17
Figura 4.1 –	Dimensões das chapas de liga de alumínio 2219 utilizadas.....	21
Figura 4.2 –	Sistema robótico Loxin PKM T805.....	22
Figura 4.3 –	Ferramenta utilizada na soldagem por BT-FSW.....	23
Figura 4.4 –	Macrografia de uma amostra de BT-FSW.....	25
Figura 4.5 –	Amostra metalográfica.....	26
Figura 4.6 –	Dimensões da amostra em mm segundo norma ISO 6892-1.....	28
Figura 5.1 –	Macrografias das amostras.....	32
Figura 5.2 –	Defeitos volumétricos.....	33
Figura 5.3 –	Comparativo das amostras de BT-FSW.....	34
Figura 5.4 –	Macrografia de amostra de BT-FSW.....	34
Figura 5.5 –	Macrografia polarizada de amostra de BT-FSW.....	35
Figura 5.6 –	Análise do tamanho do grão na região da solda.....	35
Figura 5.7 –	Fluxo de material característico e formação de defeitos.....	37
Figura 5.8 –	Mapa de dureza para amostra de BT-FSW com parâmetros otimizados.....	38
Figura 5.9 –	Perfil de dureza para amostra de BT-FSW.....	39
Figura 5.10 –	Curva de Resistência à tração x Deformação para amostra BT-29 e MB.....	40

Figura 5.11 –	Modo de ruptura por tração em amostra de BT-FSW.....	41
Figura 5.12 –	Análise perfilométrica em amostra otimizada de BT-FSW.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Composição química da liga 2219 (% peso).....	08
Tabela 3.2 –	Propriedades mecânicas da liga 2219-T0 (material base).....	09
Tabela 3.3 –	Sequência de precipitação de fases Al-Cu.....	10
Tabela 3.4 –	Propriedades mecânicas da liga 2219-T81.....	12
Tabela 4.1 –	Parâmetros de soldagem testados para as amostras de BT-FSW....	24
Tabela 5.1 –	Influência da velocidade de soldagem na resistência à tração.....	29
Tabela 5.2 –	Influência da rotação de ferramenta de soldagem na resistência à tração	30
Tabela 5.3 –	Influência da variação da força exercida pelos ombros da ferramenta de soldagem na resistência à tração.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AA -	<i>Aluminum Alloy</i> - Liga de alumínio
Al -	Alumínio
BT-FSW -	<i>Bobbin Tool Friction Stir Welding</i>
CO ₂ -	Dióxido de Carbono
Cu -	Cobre
FSW -	<i>Friction Stir Welding</i>
LA -	Lado de Avanço
LR -	Lado de Retorno
MB -	Material Base
RPM -	Rotações por Minuto
UTS -	<i>Ultimate Tensile Strength</i> - Resistência máxima à tração
ZAC -	Zona Afetada pelo Calor
ZM -	Zona de Mistura
ZTMA -	Zona Termomecanicamente Afetada

RESUMO

Dada a preocupação a respeito das taxas de emissão de carbono, sua contribuição para o efeito estufa, bem como outros impactos ambientais, a indústria aeroespacial concentra um grande esforço no desenvolvimento de novas técnicas de fabricação das aeronaves, aliando o emprego de materiais de baixo peso a novos processos de união dos materiais, aumentando a eficiência energética e reduzindo o impacto ambiental inerente a aviação. Dentro deste contexto, este trabalho foca em ilustrar o processo de otimização de parâmetros de soldagem para a liga de alumínio 2219, utilizando a técnica de Soldagem por Fricção Linear com Ferramenta de Ombro Duplo (do inglês *Bobbin Tool Friction Stir Welding - BT-FSW*), por meio de análises da microestrutura da junta soldada e por análise das propriedades mecânicas por meio de testes de tração e mapas de microdureza. A soldagem por fricção (FSW) consiste em uma das técnicas de soldagem de materiais leves de mais alto nível existentes atualmente.

As soldas e testes foram conduzidos no instituto de pesquisa Helmholtz-Zentrum Hereon, mais precisamente no Departamento de Processamento de Materiais no Estado Sólido (WMP), em Geesthacht, Alemanha. O estudo visa detalhar o processo de otimização dos parâmetros de soldagem, como velocidade de soldagem, velocidade de rotação e força aplicada entre os ombros da ferramenta de soldagem, examinando a influência dos mesmos nas características microestruturais e propriedades mecânicas. Soldas utilizando o processo BT-FSW foram produzidas com diferentes parâmetros de processo e, quando atingidos os parâmetros ótimos, as regiões soldadas foram analisadas com microscópios ópticos de alta precisão, além de terem sido submetidas a testes de tração e mapeamento de dureza a fim de se obter dados a respeito das propriedades mecânicas.

Os resultados obtidos evidenciam uma melhora significativa em termos de refino da microestrutura, conseqüentemente ocasionando um acréscimo substancial nas propriedades mecânicas quando comparadas com as obtidas por técnicas mais convencionais de soldagem envolvendo a fusão do metal base. Este estudo reforça a possibilidade da utilização desta técnica de soldagem aplicada à indústria aeroespacial.

Palavras-chave: Soldagem por Fricção com Ferramenta de Ombro Duplo (BT-FSW).
Estudo de Microestrutura. Estudo de Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Due to the significant concerns existing today regarding carbon emission rates, their contribution to the greenhouse effect, as well as other environmental impacts, the aerospace industry is focusing a great effort on developing new aircraft manufacturing techniques. This involves using lightweight materials along with new material joining processes to increase energy efficiency and reduce the inherent environmental impact of aviation. Within this context, this work aims to illustrate the welding parameters optimization process for aluminum alloy 2219, using the Bobbin Tool Friction Stir Welding (BT-FSW) technique. This is done through analyses of the welded joint's microstructure and mechanical properties via tensile tests and microhardness mapping. Friction Stir Welding (FSW) is one of the highest-level welding techniques for lightweight materials available today.

The welding and tests were conducted at the Helmholtz-Zentrum Hereon research institute, specifically in the Department of Solid-State Material Processing (WMP), in Geesthacht, Germany. The study aims to detail the welding process parameters optimization process, such as welding speed, rotation speed, and applied force between the welding tool shoulders, examining their influence on microstructural characteristics and mechanical properties. Welds using the BT-FSW process were produced with different process parameters, and when optimal parameters were achieved, the welded regions were analyzed with high-precision optical microscopes. They were also subjected to tensile tests and hardness mapping to obtain data on mechanical properties.

The results demonstrate a significant improvement in terms of microstructure refinement, consequently leading to a substantial increase in mechanical properties when compared to those obtained by more conventional welding techniques involving base material fusion. This study reinforces the possibility of using this welding technique in the aerospace industry.

Keywords: Friction Stir Welding with Double Shoulder Tool (BT-FSW). Microstructure Study. Mechanical Properties Study.

1.0 INTRODUÇÃO

Tendo em vista o aumento vertiginoso em relação às taxas de emissões de gases do efeito estufa lançados na atmosfera terrestre nas últimas décadas, inúmeras são as iniciativas, em diversas indústrias, para mitigar a contribuição para este fenômeno. Considerando a importância da aviação comercial na atualidade, é possível compreender o grande esforço por parte das fabricantes de aeronaves no intuito de reduzir o nível de emissão principalmente do CO₂, proveniente da combustão das turbinas propulsoras, causador de severos impactos na vida na Terra. Estudos recentes baseados em modelos numérico-computacionais apontam que se considerado um ciclo de vida de 20 anos para uma aeronave típica, de 185 passageiros, lança na atmosfera uma quantidade equivalente a 10000 a sua própria massa em gás carbônico (LEE et al., 2009; DOULGERIS et al., 2010).

Cientistas e engenheiros encontram-se em uma corrida incansável na busca por soluções para esta demanda atual. Inúmeras são as possibilidades quando se trata do cenário da aviação mundial. Desde novos designs das turbinas, rotas de voo que buscam uma maior eficiência energética devido ao melhor entendimento das condições climáticas que levam a tal efeito, bem como ao estudo da otimização das massas presentes em uma aeronave, as quais afetam diretamente a emissão de gases do efeito estufa. Neste contexto, o aperfeiçoamento das técnicas de fabricação da fuselagem das aeronaves se faz presente. Com o desenvolvimento de métodos mais refinados de união dos componentes pode-se atingir níveis de desempenho mais elevados ao passo que se reduz a quantidade de material empregado nos componentes, fato este que irá afetar diretamente na massa total da aeronave (HERTWICH et al., 2019; MALARVIZHI et al., 2012; XIAO et al., 2005).

Dentre as alternativas existentes para se atingir a redução desejada nas taxas de emissão de CO₂ na atmosfera, encontra-se a utilização de materiais mais leves na parte estrutural da fuselagem e de outros componentes da aeronave. Dentre as opções existentes para materiais com essas características, uma das mais amplamente utilizadas são as ligas de alumínio, as quais proporcionam também alta resistência mecânica, maleabilidade e

durabilidade. Diversas são as ligas de alumínio disponíveis no mercado, uma delas, a liga 2219, vem ganhando cada vez mais espaço em diversas aplicações na engenharia. Esta liga, por apresentar elevada resistência mecânica, baixa densidade, alta resistência contra corrosão e elevada força específica (resistência à tração do material e sua massa específica), desponta como uma das ligas mais proeminentes nesta corrida por uma aviação mais sustentável, inclusive pelo fato de componentes fabricados a partir desta liga poderem ser reciclados ao fim dos seus ciclos de vida (MALARVIZHI et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

Neste contexto de desenvolvimento de um setor aeronáutico mais consciente e sustentável, a melhoria dos processos de união dos materiais leves, como a liga 2219, são de fundamental importância. Uma das principais técnicas de união em estado sólido destes materiais é a solda por fricção linear (do inglês, *Friction Stir Welding - FSW*), na qual os materiais são unidos sem que haja a fusão dos mesmos, permitindo com que se atinja níveis de qualidade da junta muito elevados se comparado com técnicas convencionais com fusão. Com o emprego de FSW no processo de manufatura das aeronaves, tanto a integridade estrutural, quanto a eficiência energética do produto final experimentam uma melhora expressiva. Devido ao fato de ser uma solda de baixa temperatura, diferentemente de métodos convencionais que se utilizam da fusão do metal base, os componentes unidos com fricção apresentam um nível de distorção muito reduzido devido ao menor gradiente térmico existente ao longo da peça, bem como um maior refino das microestruturas resultantes do processo, as quais acarretam em melhoria nas propriedades mecânicas do componente (MALARVIZHI et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste projeto consiste na determinação de um conjunto de parâmetros de soldagem otimizados (velocidade de soldagem, velocidade de rotação e força aplicada pelos ombros da ferramenta) para a liga de alumínio 2219 quando soldada utilizando a técnica BT-FSW. Neste projeto, o enfoque será direcionado especificamente para a aplicação na indústria aeroespacial.

2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- a) determinar os principais parâmetros de soldagem para o processo BT-FSW;
- b) identificar possíveis defeitos de soldagem quando os parâmetros não são os otimizados;
- c) obter soldas sem defeitos volumétricos ou superficiais;
- d) otimização dos parâmetros de soldagem por meio de testes mecânicos a fim de se atingir as melhores propriedades mecânicas possíveis para a aplicação na indústria aeroespacial.

3.0 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cenário da indústria aeroespacial

O impacto da aviação é de grande preocupação no que tange às emissões de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), aerossóis bem como fuligem e sulfatos. Além disso, o aumento da nebulosidade na forma de trilhas de condensação e nuvens cirrus induzidas exigem atenção especial, segundo Lee (2009). O impacto do setor aeronáutico no meio ambiente, embora muito em pauta hoje, desperta interesse a décadas. Estudos conduzidos por Reinking (1968), Kuhn, (1970) já demonstraram preocupação a respeito de danos causados pela aviação na camada de ozônio (O_3). No momento atual, metas rígidas de redução nas emissões de CO_2 são impostas principalmente por agências reguladoras como a Comissão Europeia (2020) às companhias aéreas, causando grandes pressões nas mesmas e nos fabricantes das aeronaves para se adequar ao objetivo (PERES-CALDERÓN et al., 2021).

Neste âmbito, estudos como o realizado por Scotti (2015), o qual desenvolveu um modelo matemático com base nas emissões registradas no único Registro da União Europeia, verificadas por um órgão público oficial e processadas de maneira transparente e comparável, capazes de calcular as emissões de CO_2 , considerando a distância percorrida e o modelo de aeronave, mostrou que a inclusão de fatores adversos externos evita sobrestimações de alterações de produtividade e fornece medições de desempenho alinhadas com a necessidade de limitar as emissões e as alterações climáticas. Além disso, mostrou que a melhoria na maneira que se carrega a aeronave promove tanto aumento da produtividade da operação quanto reduz a emissão de CO_2 .

Dentro do contexto de esforços para mitigar as emissões de CO_2 , a utilização de materiais como o alumínio, o titânio e os compósitos, surgem como uma forma de, reduzindo a massa total dos aviões, cumprir com as metas de emissões. O titânio possui ótima resistência ao calor aliada a uma alta resistência específica. No entanto, considerando o custo de fabricação e levando em consideração as propriedades dos

materiais, as ligas de alumínio ainda têm um maior potencial de aplicação (STARKE et al., 1996).

Além disso, a futura indústria aeroespacial dependerá cada vez mais de tecnologias avançadas de fabricação para melhorar a eficiência da produção e a qualidade do produto. Portanto, é urgente desenvolver processos de processamento e fabricação avançados para ligas de alumínio (SHUANG-SHUANG et al., 2023).

3.2 Alumínio e ligas de alumínio

O alumínio é um elemento químico não ferroso de símbolo químico Al, de número atômico 13 e massa atômica de 26,98. Constituindo aproximadamente 8,3% em peso da crosta terrestre, este é o metal mais abundante no universo, encontrado geralmente na forma de bauxita. Consiste em um dos metais de mais larga utilização comercial no planeta, estando presente em uma infinidade de processos industriais dos mais diversos ramos de negócio. A primeira utilização comercialmente viável de alumínio ocorreu em 1888 através do revolucionário processo eletrolítico Hall-Héroult, e em 1886, Charles Martin Hall e Paul Héroult anunciaram que haviam descoberto como obter o metal de alumínio a partir da alumina. Notavelmente, o alumínio inicialmente era considerado tão valioso que amostras iniciais eram transformadas em joias e utensílios de cozinha de luxo, até mesmo exibidos ao lado das joias da Coroa Britânica na Exposição de Paris de 1855 (CARDARELLI et al., 2008; WANG et al., 2008).

Devido a densidade do alumínio de $2,7\text{g/cm}^3$, o mesmo é considerado um metal leve, porém de alta resistência específica. As propriedades do alumínio podem ser significativamente alteradas pela adição de elementos de liga e tratamentos térmicos. Os elementos de liga, como cobre, magnésio e silício, são adicionados para modificar as propriedades mecânicas do material, melhorando a resistência, a dureza e a resistência à corrosão. Tratamentos térmicos, como, por exemplo, tratamento térmico de solubilização e endurecimento por precipitação, são empregados para modificar ainda mais a microestrutura e melhorar as propriedades mecânicas. As características do alumínio, incluindo alta resistência à corrosão, o tornam adequado para diversas aplicações, especialmente em ambientes com elevadas tendências à corrosão. Além disso, sua capacidade de manter a resistência à baixas temperaturas torna seu uso em aplicações

criogênicas bastante promissor (MALARVIZHI et al., 2012; CARDARELLI et al., 2008; SHARMA et al., 2009).

Processamentos das ligas de Al mais modernos e otimizados, como o presente no trabalho de Suresh (2021) para a liga AA2195, permitem controlar o tamanho dos grãos e a textura do material, garantindo que as propriedades do mesmo sejam muito próximas às isotrópicas e desta forma, aumentando o leque de possíveis aplicações das ligas de alumínio.

Atualmente, o alumínio desempenha um papel na inovação na indústria aeroespacial. Dentre os destaques, estão principalmente ligas das séries 2XXX e 7XXX, amplamente empregadas em componentes estruturais de aeronaves devido à sua excelente combinação de propriedades mecânicas aliada a um baixo peso. Ligas de alumínio, especialmente aquelas da série 2XXX, demonstram resistência à fadiga elevada, garantindo a integridade estrutural dos componentes ao longo de ciclos de fadiga repetidos. A liga de alumínio 2219 desponta como uma escolha notável para construção aeronáutica. Reconhecida por sua alta relação resistência específica e soldabilidade, a liga 2219 é frequentemente a escolha quando o assunto é a fabricação de componentes aeroespaciais críticos, contribuindo para a segurança e durabilidade gerais das estruturas de aeronaves (MALARVIZHI et al., 2012; ANDERSON-WEDGE et al., 2021; WANG et al., 2008; ENTRINGER et al., 2019).

3.2.1 Liga de alumínio 2219

A liga 2219 é uma liga de alumínio-cobre reconhecida por suas excelentes propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão, o que aumenta o interesse em seu uso para aplicações de aviação. Esta liga faz parte da série 2XXX, caracterizada por seu alto teor de cobre e pela possibilidade de aumento na resistência mecânica devido ao fenômeno de envelhecimento (MALARVIZHI et al., 2012; SHARMA et al., 2009; ANDERSON-WEDGE et al., 2021).

A Tabela 3.1 ilustra a composição química da liga 2219 (% peso):

Tabela 3.1 - Composição química da liga 2219 (% peso)

Cu	Mn	Fe	Zr	V	Si	Ti	Zn	Al
5.80- 6.80	0.20- 0.40	0-0.30	0.10- 0.25	0.05- 0.15	0-0.20	0.02- 0.10	0-0.10	Balanço

Fonte: DAVIS, 1998

As ligas de alumínio-cobre (Al-Cu) são consideradas endurecíveis por envelhecimento devido à sua possibilidade de passar por este processo, o qual acarreta aumento acentuado em resistência mecânica e em dureza. Esse processo envolve uma transformação microestrutural durante o tratamento térmico.

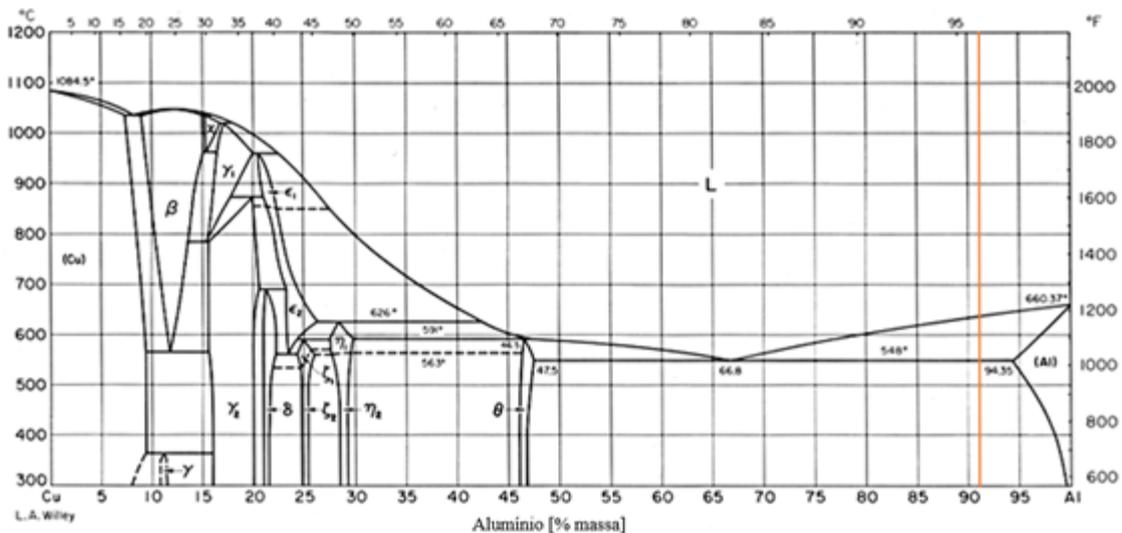


Figura 3.1 – Diagrama de fases Alumínio - Cobre

Fonte: adaptado de DAVIS, 1998

O diagrama de fases Al-Cu determina, por meio do limite de solubilidade, a máxima concentração de cobre que pode ser dissolvida no alumínio a uma determinada temperatura. A linha laranja no diagrama da Figura 3.1 corresponde à liga de alumínio 2219. É possível observar que essa liga se encontra próxima ao limite de solubilidade da fase alfa. Abaixo da temperatura eutética de 548,25 °C (821,4 K), a formação da fase θ ocorre simultaneamente com a fase α . Além dessas fases, as fases metaestáveis θ' e θ'' podem surgir durante o resfriamento e tratamento térmico do material. A microestrutura

da liga é projetada de acordo com requisitos específicos e tem um impacto direto nas propriedades finais do material (SHARMA et al., 2009; E. HUERTA et al., 2012).

A Tabela 3.2 ilustra as propriedades mecânicas da liga 2219-T0 (material base):

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas da liga 2219-T0 (material base)

Limite de Elasticidade (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Vickers (HV)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
75	175	95	95

Fonte: DAVIS, 1998

O tratamento térmico T0 envolve o tratamento de solução a 535 °C por um tempo de espera de 50 minutos, seguido por envelhecimento natural por 18 a 36 horas a temperaturas entre 163-191°C, e subsequente trabalho a frio. Em relação às propriedades mecânicas, a liga de alumínio 2219-T0 exibe uma combinação de resistência moderada ao escoamento e resistência à tração final. Essas características a tornam adequada para componentes estruturais na engenharia aeroespacial, onde tanto a resistência quanto a conformabilidade são essenciais. Além disso, a liga de alumínio 2219 possui um ponto de fusão de 543 – 643 °C e o tratamento térmico de envelhecimento pode melhorar significativamente suas propriedades (MALARVIZHI et al., 2012; DAVIS et al., 1998).

A resistência à corrosão da liga de alumínio 2219 é atribuída a formação de um filme de óxido protetor em sua superfície. O alto teor de cobre permite que se formem precipitados resistentes à corrosão, que atuam como uma barreira, impedindo a corrosão adicional. Essa característica torna a liga de alumínio 2219 adequada para aplicações em ambientes adversos, como aeroespacial, onde a exposição a condições climáticas adversas é comum (XIE et al., 2021; ROMÁN et al., 2021).

A soldabilidade da liga de alumínio 2219 é outro aspecto de grande relevância pois afeta diretamente a capacidade da mesma de ser utilizada para a fabricação de estruturas aeroespaciais de grande complexidade geométrica. Componentes fabricados com esta liga podem ser unidos por meio de diversos processos de soldagem, incluindo FSW e BT-FSW. Essa soldabilidade contribui para a facilidade de fabricação e montagem

de componentes, tornando a AA2219 uma escolha adequada na indústria aeroespacial (MALARVIZHI et al., 2012).

3.2.2 Tratamento Térmico T81 para a liga de alumínio 2219

As ligas de alumínio-cobre (Al-Cu) são conhecidas por suas características de endurecimento por envelhecimento, fenômeno que permite uma melhoria significativa nas propriedades do material. Ligas de alumínio endurecíveis por envelhecimento passam por uma transformação microestrutural durante o tratamento térmico. Na fase de solução sólida, os elementos de liga se dissolvem completamente, e o material exibe comportamento semelhante a um material de fase única. Durante o envelhecimento, os elementos de liga se agrupam (formando *clusters*) que posteriormente evoluem para diferentes formas de pequenos precipitados, cuja natureza e quantidade dependem da temperatura de envelhecimento (SHARMA et al., 2009; VOROBYOV et al., 2022).

Para as ligas Al-Cu, a sequência de precipitação é a seguinte (conforme Tabela 3.3): $\alpha_n \rightarrow \alpha_1 + \text{Zonas Guinier - Preston (zonas GP)} \rightarrow \alpha_2 + \theta'' \rightarrow \alpha_3 + \theta' \rightarrow \alpha_4 + \theta$

Tabela 3.3 – Sequência de precipitação de fases Al-Cu

Fase	Características
α_n	Essa fase é o alumínio CFC. O subscrito n denota cada equilíbrio com precipitados individuais (GP_1 , θ'' , θ' e θ).
Zonas GP	As zonas GP são camadas monoatômicas de Cu no plano $\{100\}_{Al}$
θ''	θ'' são discos finos, totalmente coerentes com a matriz.
θ'	θ' são em precipitados em forma de disco, semi coerentes no plano $\{100\}_{Al}$. Composição: $CuAl_2$ de estrutura TCC.
θ	θ são interfaces incoerentes, em forma de disco. Composição: $CuAl_2$ de estrutura TCC complexa.

Fonte: SHARMA, 2009

O tratamento térmico T81 é descrito como um processo que envolve tratamento térmico de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial. As chapas passam

pelo processo de solubilização a 535 °C onde permanecem por cerca de 50 minutos, sendo posteriormente resfriadas em água. Posteriormente, as chapas sofrem endurecimento por deformação a frio. Finalmente, ocorre o envelhecimento artificial a uma temperatura de 175 °C com um tempo de espera de 18 horas (DAVIS et al., 1998; VOROBYOV et al., 2022).

Durante o tratamento térmico, os átomos de cobre presentes no interior da matriz de alumínio dão origem a estruturas conhecidas como zonas Guinier-Preston (GP), conforme indicado na Tabela 3.3. Essas zonas, caracterizadas por sua forma de disco, sofrem uma transição para a fase θ'' . Esta fase, por sua vez, possui uma composição de Al_2Cu . Conforme o fenômeno de envelhecimento avança, precipitados de θ' surgem, deslocando as zonas GP instáveis. Essas fases metaestáveis de θ' mantêm uma forma semelhante a um disco. Conforme o material super envelhece, grandes aglomerações de fases θ se desenvolvem, às custas da dissolução de outras fases. É fundamental notar que durante todas as transformações de fase que ocorrem, teor total de cobre dentro do sistema não se altera (SHARMA et al., 2009; ANDERSON-WEDGE et al., 2021).

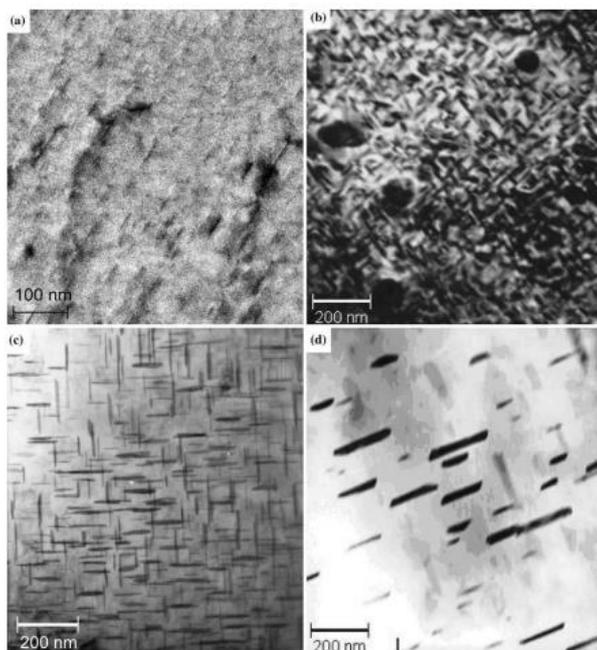


Figura 3.2- Micrografias de transmissão eletrônica mostrando a estrutura da liga 2219 em diferentes condições

Legenda: (a) zonas GP na condição de envelhecimento natural, (b) precipitados θ'' na condição abaixo do envelhecimento, (c) precipitados θ' na condição envelhecimento de pico e (d) precipitados θ na condição superenvelhecimento

Fonte: SHARMA, 2009

Visando a obtenção de uma microestrutura mais refinada e, conseqüentemente, propriedades mecânicas aprimoradas, é fundamental que haja a compreensão da evolução dos precipitados durante qualquer processamento do material. Além disso, o endurecimento das ligas de alumínio resulta de várias interações entre discordâncias e precipitados, os quais atuam como barreiras ao movimento das discordâncias. É importante enfatizar que a composição química permanece inalterada em relação a presente na Tabela 3.1, sofrendo apenas mudanças microestruturais. A Tabela 3.4 ilustra as propriedades mecânicas da liga de alumínio 2219 após tratamento térmico T81 (ANDERSON-WEDGE et al., 2021):

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da liga 2219-T81

Limite de Elasticidade (MPa)	de Limite de resistência à tração (MPa)	de Dureza Vickers (HV)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
352	455	145	103

Fonte: DAVIS, 1998

De acordo com o estudo conduzido por Entringer (2019) e Gao (2014), às principais fases que resultam em aumento de resistência mecânica e dureza para ligas comerciais envelhecidas compostas por Al-Cu-Li como a liga do presente estudo (AA2219) são, além de θ' (Al_2Cu), os precipitados conhecidos como T_1 (Al_2CuLi), os quais apresentam formato de plaquetas e se formam no plano $\{1,1,1\}$ da matriz de Al. Donnadiu (2010) também estudou este precipitado, considerado o de maior influência nas propriedades destas ligas, porém não obteve avanços significativos na compreensão do mecanismo de formação do mesmo. Noble (2013) sugere que os precipitados T_1 se nucleiam com a ajuda de duas discordâncias parciais de Shockley em planos adjacentes $\{1,1,1\}_{\text{Al}}$. No entanto, Howe (1988) afirma que a fase T_1 também se forma em discordâncias helicoidais em ligas de baixa supersaturação e conjectura que os precipitados T_1 se nucleiam a partir de zonas GP em ligas de alta supersaturação. Por meio de microscopia eletrônica de transmissão, Gao (2014) confirmou que a fase T_1 se nucleia na sua própria zona GP_{T_1} e evoluem em dois caminhos.

3.3 Solda por fricção (FSW)

A solda por fricção se baseia no princípio de união de materiais em estado sólido. Dentre as variantes existentes, destaca-se a técnica de solda por fricção e mistura mecânica, também conhecida por sua nomenclatura em inglês, *Friction Stir Welding (FSW)*, desenvolvida em 1991 no instituto de pesquisas *The Welding Institute (TWI)*. A grande revolução deste processo é a possibilidade de unir materiais sem que ocorra a fusão dos mesmos e sem que haja a necessidade do emprego de metal de adição, fato este que leva a uma redução de peso muito considerável. Ao longo dos anos, esta técnica se provou bastante eficiente, especialmente para metais, tornando seu uso cada vez mais amplo. Na aplicação da técnica para soldagem de metais, no primeiro passo, a sonda rotativa adentra no material. No segundo passo, o ombro da ferramenta de soldagem é pressionado contra o substrato, e concomitantemente rotacionado, plastificando o material e gerando calor por atrito. No instante em que se tem amolecimento suficiente do metal, a ferramenta de soldagem se move na direção da soldagem, deixando uma junta sólida, na qual ocorre a mistura do material que compõe o substrato por parte da ferramenta de soldagem (SAMBASIVAM et al., 2023).

A ferramenta de soldagem utilizada na técnica de solda por fricção e mistura mecânica (FSW), por sua vez, é do tipo não consumível e é confeccionada utilizando materiais resistentes ao desgaste e a elevadas temperaturas. O calor necessário para o processo é gerado por meio do atrito na superfície da ferramenta, fato este que acarreta na plastificação do metal. Geralmente, é adotada uma abordagem de união em apenas um lado do componente a ser soldado, utilizando uma ferramenta com um ombro e uma sonda, e uma placa de apoio é necessária para estabilizar o processo no lado oposto ao da ferramenta. A esta configuração de processo, frequentemente se denomina FSW convencional. Originalmente concebida para facilitar a união de materiais difíceis de soldar, como as ligas de alumínio de alta resistência das séries 7XXX e 2XXX, a tecnologia rapidamente mostrou sua versatilidade ao unir uma variedade de outros materiais, incluindo Al, Pb, Mg, Ti, Cu, Zn e diversos tipos de aços, tanto em configurações similares quanto dissimilares (ENTRINGER et al., 2019).

Os avanços observados desde a criação desta técnica na década de 90 promoveram uma mudança muito significativa na indústria por permitir a união de materiais que antes representavam um grande desafio. Tendo em vista as características

únicas e inerentes ao processo de FSW, o mesmo segue sendo eficiente e confiável, e desta maneira, promovendo grandes mudanças no cenário global, permitindo que sejam fabricados componentes soldados de alta qualidade (PADHY et al., 2018).

3.3.1 Solda por fricção do tipo *Bobbin Tool* (BT-FSW)

O método de solda por fricção do tipo BT-FSW consiste em uma variante do método de FSW convencional, onde o maior diferencial encontra-se no desenho da ferramenta de soldagem. Esta, por sua vez, apresenta uma sonda que transpassa a espessura do material, responsável por misturar o material no estado plastificado promovendo a união das chapas, e dois ombros, um superior e outro inferior, conforme ilustra Figura 3.3. O último, substitui a placa de apoio necessária para a soldagem utilizando FSW convencional, devido ao fato de estar em contato com a superfície oposta da chapa a ser soldada, possibilitando uma maior eficiência no fluxo de material durante a soldagem e na geração de calor. Desta maneira, a aplicação da técnica de BT-FSW se torna mais versátil, podendo ser aplicada em estruturas ocas como extrusões, tanques e tubulações, as quais não seriam possíveis caso fosse exigida a presença de uma placa de apoio (SHAO et al., 2022).

O fato de a sonda penetrar completamente em toda a espessura da chapa soldada acaba por eliminar defeitos de soldagem comuns ao método de FSW convencional como defeitos de raiz. O controle da força com a qual os ombros pressionam a chapa permite que se tenha uma maior estabilidade do processo (SHAO et al., 2022).

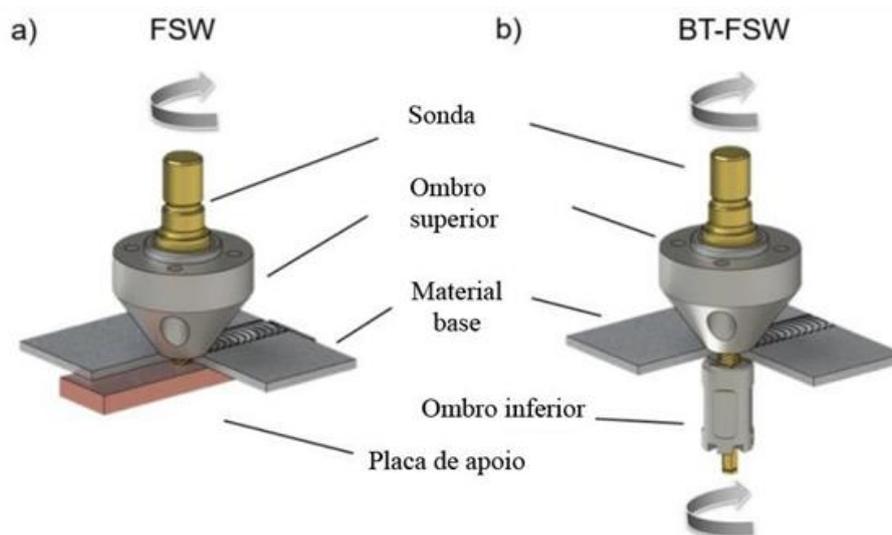


Figura 3.3 – Representação da ferramenta

Legenda: a) FSW; b) BT-FSW

Fonte: Adaptado de ENTRINGER, 2019

3.4 Parâmetros de processo

Os parâmetros de processo são de fundamental importância para a obtenção de uniões soldadas de alta qualidade no processo de BT-FSW. Sua influência na microestrutura e, conseqüentemente nas propriedades mecânicas, é direta. Assim como descrito por Dumpala (2022), dentre os diversos parâmetros existentes durante o processo de soldagem, três deles se destacam como parâmetros chave para a obtenção das juntas com a melhor qualidade possível, são eles: velocidade de soldagem, velocidade de rotação da ferramenta de soldagem e força de compressão aplicada pelos ombros da ferramenta. De acordo com Esmaily (2016), parâmetros utilizados no método FSW quando testados para BT-FSW levam a formação de defeitos na seção transversal da solda e, portanto, não são intercambiáveis.

A velocidade de rotação na soldagem por fricção do tipo BT-FSW refere-se à velocidade com que a ferramenta gira ao redor de seu eixo durante o processo de soldagem. O entendimento deste parâmetro de processo é crucial para que se entenda a geração de calor e o fluxo de material envolvidos neste método de soldagem. Velocidades de rotação mais elevadas causam um aumento da temperatura no local onde se está sendo realizada a solda devido ao aumento da fricção entre a ferramenta e o material base, esta condição ocasiona uma maior plastificação do material, influenciando na resistência do mesmo em ser deslocado pela movimentação da ferramenta, e conseqüentemente

influenciando na qualidade da junta soldada. Desta forma, deve-se buscar o equilíbrio entre calor gerado suficientemente grande para que se obtenha uma plastificação adequada do material base, porém sem que haja excessivo aporte térmico a ponto de iniciar a formação de rebarbas na região de solda ou até mesmo defeitos na microestrutura (HILGERT et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

A força de compressão aplicada pelos ombros da ferramenta contra o material base consiste em um parâmetro crítico para a soldagem por fricção do tipo BT-FSW. Influencia diretamente na profundidade na qual a ferramenta irá penetrar no material base, determinando diretamente a qualidade do acabamento da união soldada. O controle adequado desta pressão exercida sobre o material base é fundamental para que se plastifique o material na medida certa, proporcionando a correta consolidação do mesmo. Forças aplicadas muito altas podem promover o surgimento de rebarbas provenientes da penetração excessiva da ferramenta no material que, por sua vez, irá extravasar pela lateral dos ombros da ferramenta, formando as rebarbas. A espessura da chapa, propriedades do material e acabamento final da solda desejado são fatores que influenciam na força a ser aplicada pela ferramenta (HILGERT et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

A velocidade de soldagem é definida como a taxa na qual a ferramenta se move ao longo da linha soldagem durante o processo de BT-FSW. A escolha de qual velocidade de soldagem se deve utilizar, determina o tempo de permanência da ferramenta de soldagem em uma determinada região do material base. Uma velocidade mais elevada acarreta em um menor tempo de permanência, ao passo que, uma menor velocidade acarreta em maior tempo. O correto ajuste da velocidade de soldagem influencia diretamente na taxa de resfriamento do material base, o que afeta a solidificação e as propriedades mecânicas da solda. A escolha dos três parâmetros chave (ilustrados na Figura 3.4) de maneira conjunta e acertada é fundamental para a obtenção de uma união bem formada, sem defeitos e com elevadas propriedades mecânicas (HILGERT et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

Outro parâmetro que, em menor escala se comparado com os três mencionados anteriormente, pode exercer influência nos resultados é o ângulo de inclinação da ferramenta em relação aos eixos X e Y. Este ajuste do ângulo de inclinação influencia na profundidade de penetração dos ombros no material base, bem como no fluxo do material

na zona de mistura (ZM) da solda. Seu correto ajuste contribui para a estabilidade e o controle do processo (HILGERT et al., 2012; ENTRINGER et al., 2019).

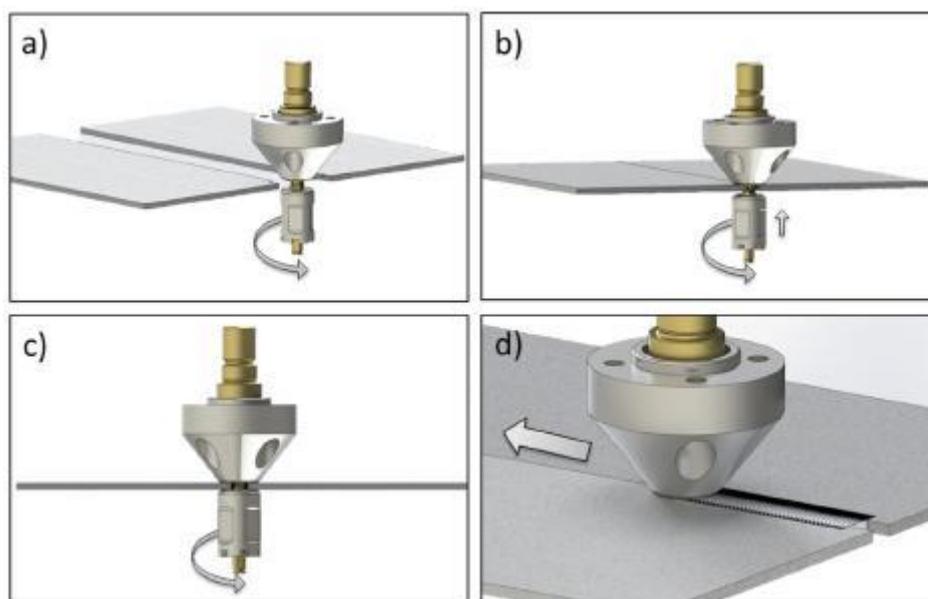


Figura 3.4 – Parâmetros de processo. a) Velocidade de rotação; b) Força aplicada pelos ombros da ferramenta; c) Velocidade de rotação e força aplicada pelos ombros da ferramenta simultaneamente e d) Velocidade de soldagem.

Fonte: Adaptado de GOEBEL, 2017

3.4.1 Microestrutura das juntas soldadas por BT-FSW

A microestrutura resultante do processo de soldagem envolvendo a técnica de BT-FSW está intimamente ligada com os parâmetros de processos escolhidos e com a geometria da ferramenta utilizada. Alterações em fatores como a velocidade de soldagem, velocidade de rotação da ferramenta e força aplicada pelos ombros da mesma ocasionam mudanças drásticas no padrão observado nas análises por microscopia. É possível visualizar diferentes distribuições dos precipitados, diferenças no tamanho dos grãos resultantes, bem como alterações no fluxo de material na região onde ocorreu a mistura do material base. A presença ou não de defeitos superficiais ou volumétricos na região observada está diretamente relacionada à combinação de parâmetros utilizados (GOEBEL et al., 2017; ENTRINGER et al., 2019; HILGERT et al., 2012).

A fim de analisar as micrografias da área soldada das amostras, define-se duas regiões com base no sentido de rotação da ferramenta. Considerando que no caso

estudado, a rotação da mesma ocorria no sentido horário, o lado de avanço da ferramenta (LA) se localizaria na parte esquerda da micrografia, ao passo que o lado de retorno (LR) estaria na parte direita da imagem, conforme observado na Figura 4.4, a qual será analisada no próximo capítulo.

3.5 Trabalhos anteriores

Entringer (2019) avaliou a microestrutura de amostras soldadas por *Bobbin Tool* bem como avaliou a evolução dos precipitados resultantes deste processo e seu papel nas propriedades mecânicas. Além disso, o ciclo térmico existente em um processo de solda por BT-FSW foi analisado. Neste trabalho as ligas de Al-Cu-Li escolhidas foram AA2196-T8 e AA2060-T8. Como parâmetro de processo, foi utilizado velocidade rotacional da ferramenta de 150 rpm, velocidade de soldagem de 150 mm/min com uma força exercida pela ferramenta constante e igual a 5,5 kN. Com estes parâmetros, foram obtidas soldas livres de defeitos para as duas ligas de alumínio, sendo que os valores de resistência à tração ficaram em 70% da UTS do material base para a liga AA2196 e em 78% para a liga AA2060. A dureza, por sua vez, variou entre 110-130 HV para a liga 2196 e entre 128-135 HV para liga 2060, para ambos os casos a dureza do material base é 170 HV. A análise apontou para a dissolução de precipitados como a fase T1, bem como para o superenvelhecimento dos precipitados oriundos do material base como sendo os principais causadores da redução das propriedades mecânicas originais do material. Temperaturas acima de 450 graus celsius como as medidas na zona de mistura (ZM) possuem uma forte influência nesta redução de dureza e resistência mecânica.

Yadav (2023) realizou um estudo acerca da microdureza em amostras de AA6063 soldadas por BT-FSW. Como parâmetro de processo, foi utilizado velocidade rotacional da ferramenta de 800, 1000 e 1200 rpm, velocidade de soldagem de 50, 100 e 150 mm/min, não foi informado o valor utilizado para a força exercida pela ferramenta. Utilizando-se uma sonda de 5,5 mm de diâmetro, com velocidade de soldagem de 100 mm/min e 1200 rpm, foi obtida uma dureza média de 91 HV (77% da dureza do material base, aproximadamente). Neste estudo, foi desenvolvido um modelo para a avaliação de quais parâmetros do processo são mais influentes para a microdureza, o que apontou para

a velocidade de rotação da ferramenta como sendo o mais influente, seguido do diâmetro da sonda.

Gaohui (2023) utilizou-se do método de soldagem por BT-FSW, tanto em sua variante convencional (a mesma utilizada neste presente trabalho) em sua variante semi-estacionária, na qual apenas um dos ombros da ferramenta rotaciona e o outro é mantido estático, para soldar a liga de magnésio AZ31B-O. Utilizou-se uma velocidade de rotação de 1100 rpm com uma força exercida de 4 kN. A velocidade de soldagem variou entre 300 a 1000 mm/min. Para esta liga em específico, foram obtidas soldas livres de defeitos para as velocidades de soldagem de 700 e 900 mm/min. Para a resistência à tração, foram obtidas eficiências de 87% em relação ao material base.

Goebel (2017) avaliou a aplicação de BT-FSW para a liga de alumínio AA2198-T851, obtendo resultados expressivos de 82% da tensão máxima de ruptura (UTS) e 77% da dureza, ambos em relação ao material base. Para obter estes valores, a ferramenta utilizada era equipada com uma sonda de 7 mm de diâmetro, com ambos os ombros de 15 mm. O material utilizado para a manufatura da mesma foi a liga de níquel-cobalto MP159.

Dumpala (2022), realizou um estudo acerca da utilização de BT-FSW para soldar chapas de 6 mm de espessura de AA6063, foi observado que para esta espessura de chapa, os melhores resultados para resistência à tração foram obtidos com os seguintes parâmetros: 800 rpm, velocidade de soldagem de 80 mm/min sem referências a força aplicada pelos ombros da ferramenta. Foi atingido um resultado bastante consistente de 73.9% da UTS do material base, bem como 73% da dureza original.

Fuse (2018), realizou uma revisão a respeito do método de soldagem por BT-FSW, nela, foram abordados pontos importantes como a geometria da ferramenta, sobre a qual se afirmou que o ombro superior deve possuir um diâmetro maior do que o inferior. Entretanto, se o mesmo for muito reduzido, ocasionará a formação de defeitos em forma de sulco em ambas as superfícies da chapa, com o surgimento de rebarbas na parte inferior.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será abordada detalhadamente a metodologia utilizada para a fabricação das soldas das chapas de liga de alumínio 2219 utilizando a técnica de *Bobbin Tool Friction Stir Welding (BT-FSW)*. A metodologia seguida neste presente trabalho se baseou na utilizada por Goebel (2017) e Entringer (2019).

4.1 Material

As chapas utilizadas neste estudo possuem a mesma composição, a composição da liga 2219-T8, conforme a Tabela 3.1. Assim como no estudo desenvolvido por Gaohui (2023) e por Entringer (2019), a espessura das chapas utilizadas foi de 3 milímetros, com comprimentos que variam entre 300, 500 e 1000 milímetros, conforme Figura 4.1. Em relação ao tratamento térmico utilizado, pode-se afirmar que o mesmo seguiu as conformidades da norma AMS2770.

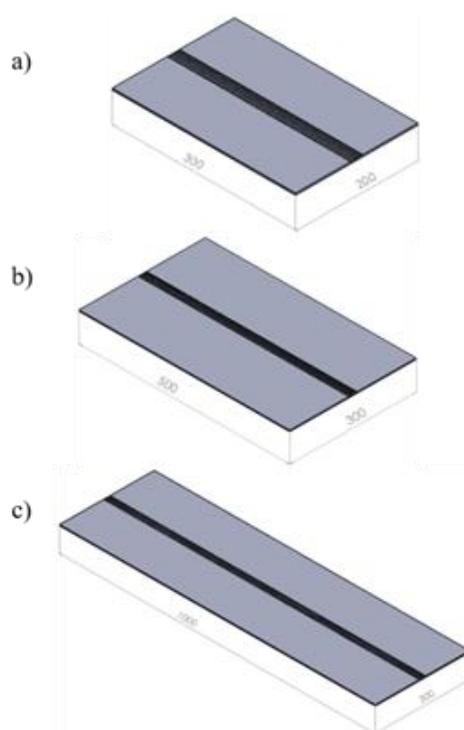


Figura 4.1 - Dimensões das chapas de liga de alumínio 2219 utilizadas.

Legenda: a) 300x200mm b) 500x300mm e c) 10000x300mm.

Fonte: o autor

4.2 Procedimento de soldagem

O processo de soldagem foi realizado em um sistema robótico Loxin PKM T805 (Figura 4.2) com cinco eixos paralelos equipado com um cabeçote de soldagem customizado para a técnica de BT-FSW, o mesmo modelo utilizado por Entringer (2019), Goebel (2017) e Gaohui (2023).



Figura 4.2 - Sistema robótico Loxin PKM T805
Fonte: o autor

Este sistema robótico possui um atuador axial visando auxiliar no movimento perpendicular dos ombros da ferramenta de BT-FSW durante a soldagem, permitindo que a máquina seja operada de dois modos: um deles com mantendo a força aplicada pelos ombros (*gap force*) constante e o outro mantendo a distância entre os ombros da ferramenta (*shoulder gap*) constante todo o processo de soldagem. Neste trabalho, apenas o modo de força constante foi utilizado durante as diversas soldas realizadas, assim como utilizado por Entringer (2019). A programação do robô consiste na pré-definição do caminho de soldagem, controlando o movimento do cabeçote de solda. Sua precisão é de aproximadamente $\pm 0.08\text{mm}$ e com uma repetibilidade de $\pm 0.01\text{mm}$.

A ferramenta utilizada nas soldas BT-FSW possui um diâmetro de sonda de 7 mm, com diâmetros de ombro superior e inferior de 16 mm e 17 mm, respectivamente, conforme Figura 4.3, de acordo com a relação entre diâmetros inferior e superior proposta por Fuse (2018). A sonda é confeccionada em liga de níquel-cobalto MP159, com a presença de pequenos ressaltos em zigzag para promover uma maior mistura do material soldado. O ombro da ferramenta é feito em aço ferramenta com molibdênio e vanádio

(X38CrMoV5-1). Esta ferramenta é bastante similar a utilizada por Entringer (2019), o qual obteve sucesso em seu trabalho, porém com ombros um pouco maiores se comparados aos dois de 15 mm utilizados. Gaohui (2023), também utilizou uma sonda com 7 mm de diâmetro, porém optou por um ombro superior de 17 mm e um inferior de 15 mm, também obtendo resultados satisfatórios em seu trabalho.

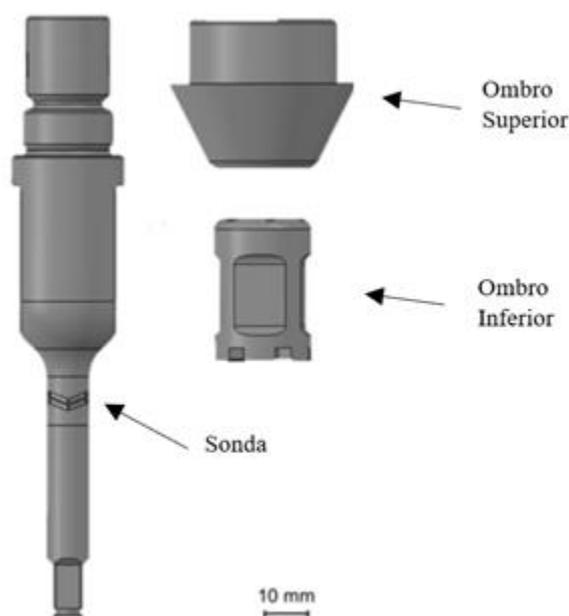


Figura 4.3 - Ferramenta utilizada na soldagem por BT-FSW

Fonte: Adaptado de ENTRINGER, 2019

4.2.1 Otimização de Parâmetros

Em relação aos principais parâmetros de soldagem para a técnica de BT-FSW, foi observado, assim como identificado por Dumpala (2022) e Entringer (2019), que os mais influentes na qualidade final da solda são: velocidade de soldagem (*welding speed*), rotação da ferramenta e força aplicada entre os dois ombros da ferramenta (*gap force*). A partir da constatação de quais eram os principais parâmetros, o estudo consistiu em uma análise da otimização destes.

Durante a análise, um dos três parâmetros era alterado (como ilustrado na Tabela 4.1), mantendo-se dois deles inalterados, a fim de se obter soldas sem defeitos visuais. Desta forma, foi possível realizar uma análise estatística, posteriormente, a qual permitiu inferir qual combinação de parâmetros viria a ser a otimizada.

Tabela 4.1– Parâmetros de soldagem testados para as amostras de BT-FSW

Amostra	Força exercida pelos ombros da ferramenta (N)	Rotação da ferramenta (rpm)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Angulação da ferramenta (eixo Y)
BT-20	3500	300	300	0
BT-21	3500	350	300	0
BT-22	3500	400	300	0
BT-23	3500	300	200	0
BT-24	3500	350	200	0
BT-25	3500	400	200	0
BT-26	3500	300	400	0
BT-27	3500	350	400	0
BT-28	3500	400	400	0
BT-29	4000	400	200	0
BT-30	3750	400	200	0
BT-31	4000	400	200	0

Fonte: o autor

4.2.2 Envelhecimento Natural

Durante a realização da soldagem por BT-FSW, as chapas soldadas passam por um ciclo térmico devido a energia inerente ao processo. Devido a este fato, após a realização das soldas as chapas permaneciam em repouso pelo período de uma semana para que ocorresse o processo de envelhecimento natural da liga e, só então, testes posteriores nas mesmas eram conduzidos. (Li et al., 2023)

4.3 Caracterização Metalográfica

Durante o presente trabalho, a análise metalográfica esteve focada em quatro regiões de interesse, são elas, material base (MB), zona termomecanicamente afetada (ZTMA), zona termicamente afetada (ZTA), também chamada de zona afetada pelo calor

(ZAC), e zona de mistura (ZM), conforme Figura 4.4. A zona termicamente afetada, por sua vez, é a região na qual são encontrados os pontos com os menores valores de dureza e resistência mecânica experimentalmente medidos.

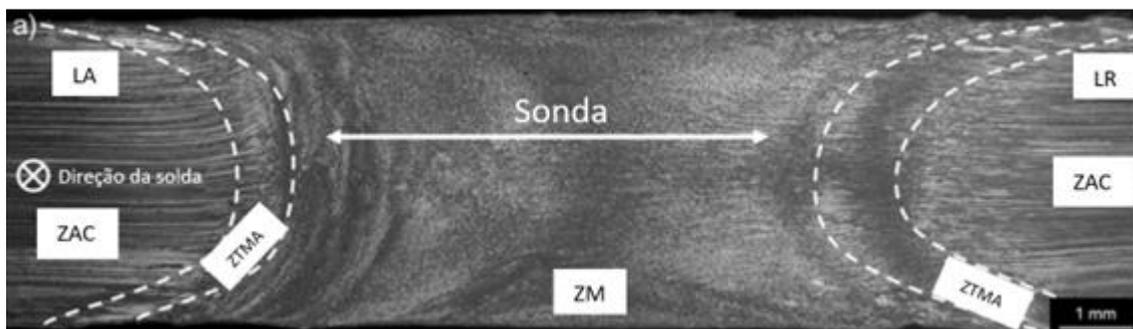


Figura 4.4 - Macrografia de uma amostra de BT-FSW.
Adaptado de: GOEBEL, 2017

4.3.1 Preparo das Amostras

Após o período de envelhecimento natural das amostras, é realizado o corte das chapas para a retirada de amostras de 40 x 20 mm, sendo a espessura a mesma da chapa original, 3 mm, conforme Figura 4.5. A orientação do corte das amostras se dá perpendicular à direção de soldagem. Para o facilitar o processo de lixamento e polimento das amostras, as mesmas foram embutidas a frio utilizando a resina Demotec 20.

O preparo das amostras após o embutimento seguiu o processo usual de lixas de SiC com posterior polimento com panos e pasta de diamante para obtenção de um acabamento especular. Durante esta etapa de preparo, a máquina utilizada foi a politriz automática *Struers Tegramin-30*. Para o ataque das amostras de BT-FSW, a solução escolhida foi a conhecida como BARKER (1% volume da solução de HBF_4), a mesma utilizada por Entringer (2019). O ataque foi realizado a um potencial de 25V durante o período de 70 segundos.

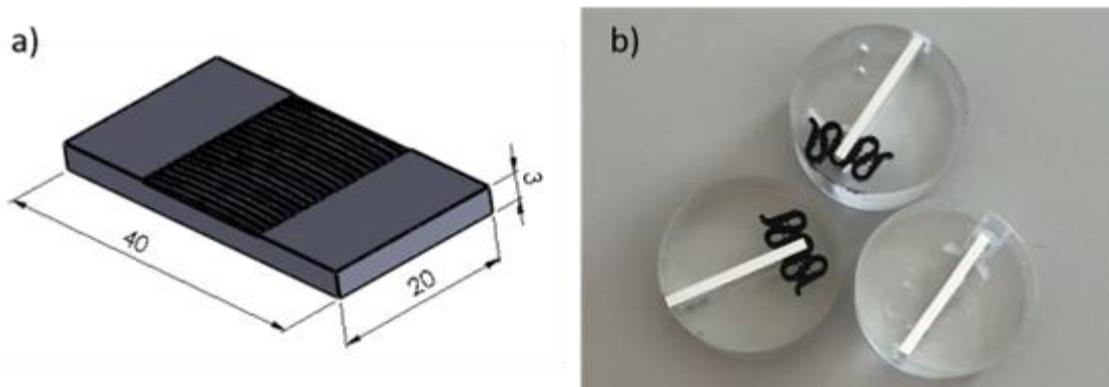


Figura 4.5 - Amostra metalográfica
 Legenda: a) Geometria da amostra em mm. b) Amostra embutida.
 Fonte: o autor

4.3.2 Análise Microscópica

Finalizadas as etapas de embutimento, lixamento e polimento das amostras, as mesmas eram levadas para análise no microscópio óptico Keyence VHX-6000, o qual permite magnificação de 20X, 50X, 100X, 500X e 1000X. O foco desta análise era avaliar os tamanhos de grão, o fluxo de material base, presença ou não de defeitos e microestrutura presente na região da solda. Para a visualização dos contornos de grão, empregando luz polarizada, utilizou-se o microscópio digital Leica, com magnificação de 50X, 75X e 100X. Os resultados foram analisados conforme a norma ASTM E112-13. A determinação do tamanho médio de grão ocorreu conforme a norma ISO 643 (2019).

4.3.3 Análise Topográfica

A fim de se medir a qualidade do acabamento superficial final dos processos de soldagem por BT-FSW, foi utilizado o perfilômetro Keyence VR Series, o qual permite uma leitura 3D da rugosidade da chapa soldada sem que haja a necessidade de contato entre o equipamento e mesma e com resolução de 0.1 μm .

4.3.4 Análise por difração de Raio-X

A região da junta soldada foi analisada no equipamento de tomografia por raio-X YXLON Y.Cougar, o qual permite que se verifique a presença ou não de defeitos

volumétricos internos na chapa. Para esta análise, a tensão do equipamento estava configurada em 57 kV e a corrente em 43 μ A, utilizou-se o feixe P07b PETRA III e para calibração, LaB₆. O processamento das imagens obtidas por esta técnica foram analisadas conforme a norma ISO 643:2019.

4.4 Caracterização mecânica

4.4.1 Mapa de dureza

A dureza das amostras provenientes das juntas soldadas de liga de alumínio 2219 unidas por BT-FSW tiveram suas durezas avaliadas utilizando o equipamento Struers DuraScan, equipado com um sistema de indentação com controle da carga aplicada sobre a superfície da amostra. Diversas medições de microdureza foram realizadas, conforme a norma ISO 6507. Nestes testes, empregou-se o indentador piramidal de diamante com ângulo de 136° e uma carga baixa de 0,2 kg por 10 segundos. Para a tomada das medidas de microdureza, optou-se pela função de mapeamento, presente no equipamento DuraScan, a fim de que fosse possível obter um perfil de medidas que incluísse tanto o material base quanto a região da solda, com pontos distantes 0.2 mm um do outro, a fim de se avaliar de qual maneira o processo de soldagem por BT-FSW influencia nesta propriedade.

4.4.2 Ensaio de tração

Visando avaliar as propriedades mecânicas da liga de alumínio 2219, tanto amostras de material base (para avaliar as propriedades do material original), quanto amostras soldadas, foram ensaiadas em uma máquina de tração Zwick Roell. Os ensaios foram conduzidos conforme norma ISO 6892-1 para materiais metálicos em temperatura ambiente. A seção transversal das amostras ensaiadas (conforme Figura 4.6), por sua vez, possuía 75 mm² e o carregamento da mesma se deu a uma taxa de 1 mm/min. Posteriormente a realização dos testes, informações cruciais para a análise do material foram obtidas, como, tensão limite de resistência à tração, limite de elasticidade e

elongação, tanto para o material base (liga 2219 anterior ao processo de soldagem), quanto para as amostras soldadas por BT-FSW. Desta maneira, é possível definir o quão influente é o impacto negativo do processo de soldagem utilizando esta técnica nas propriedades mecânicas do material, servindo inclusive para comparativo em relação ao impacto causado quando se utiliza uma técnica convencional de soldagem envolvendo fusão do metal base.

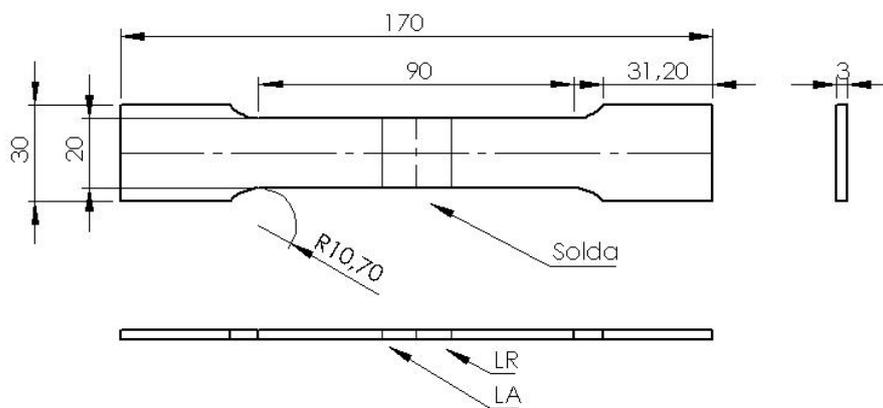


Figura 4.6 - Dimensões da amostra em mm segundo norma ISO 6892-1.
Fonte: norma ISO 6892-1

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Efeito dos parâmetros de processo nas juntas soldadas por BT-FSW

A partir das tendências observadas ao longo do período de realização das soldas, o que fica evidente é que os parâmetros de processo da técnica de BT-FSW devem ser analisados em conjunto, e não individualmente. A correta seleção dos parâmetros de soldagem consiste no principal fator responsável pela obtenção de uniões soldadas com ausência de defeitos. A escolha certa de apenas um dos parâmetros não garante que se atinja o padrão de qualidade desejado, ou seja, um parâmetro otimizado, deve estar alinhado com a correta escolha para os demais parâmetros existentes para este determinado processo, na forma de um conjunto de parâmetros otimizados. Dentro da análise realizada acerca das juntas soldadas, a ausência de defeitos e o valor de tensão máxima de resistência à tração foram considerados critérios chave para a avaliação dos resultados. A Tabela 5.1 demonstra de que forma a influência dos parâmetros foi avaliada.

Tabela 5.1 – Influência da velocidade de soldagem na resistência à tração

Amostra n°	Força exercida pelos ombros da ferramenta (N)	Velocidade rotacional da ferramenta (RPM)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Angulação da ferramenta (Eixo Y)	Resistência à tração (MPa)
BT-20	3500	300	300	0	255,6
BT-21	3500	350	300	0	219,8
BT-22	3500	400	300	0	164,4
BT-23	3500	300	200	0	282,4
BT-24	3500	350	200	0	315,9
BT-25	3500	400	200	0	313,7

Fonte: o autor

Conforme ilustra a Tabela 5.1, as soldas foram realizadas alterando um dos parâmetros dentre os quatro existentes e fixando outros 3, neste caso o enfoque está na influência da velocidade de soldagem. Desta forma, ao se observar os valores de

resistência máxima à tração obtidos, e considerando que nenhuma junta apresenta defeitos, fica explícito que as soldas de maior qualidade foram conseguidas em velocidades mais baixas de soldagem (200 mm/min diante de 300 mm/min), de acordo com o observado por Liu (2013).

A diferença expressiva existente entre a resistência à tração obtida na solda de número BT-24 (observada na Tabela 5.2), na qual se atingiu 315,9 MPa utilizando uma velocidade de soldagem de 200 mm/min e 350 rpm em comparação com a solda de número BT-22 com apenas 164,4 MPa, utilizando uma velocidade de soldagem de 300 mm/min e 400 rpm foi atribuída ao fenômeno de recristalização dinâmica descrito por Albaijan (2022), responsável por ocasionar um aumento significativo na resistência à tração por meio de um refino dos grãos, o qual, por sua vez, permite que haja um maior travamento do movimento das discordâncias do material no momento em que se aplica carga na amostra.

Tabela 5.2 – Influência da rotação de ferramenta de soldagem na resistência à tração

Amostra n°	Força exercida pelos ombros da ferramenta (N)	Velocidade rotacional da ferramenta (RPM)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Angulação da ferramenta (Eixo Y)	Resistência à tração (MPa)
BT-24	3500	350	200	0	315,9
BT-25	3500	400	200	0	313,7

Fonte: o autor

Assim como descrito por Zhou (2017), velocidades de rotação não otimizadas levaram a formação de defeitos em formas de cavidades. Foi possível observar que algumas amostras apresentavam defeitos ao longo do caminho de soldagem, relacionados diretamente com parâmetros de processo não otimizados e responsáveis diretos por quedas acentuadas nos valores referentes às propriedades mecânicas das amostras. Prova disto é a amostra BT-22, a qual apresentava o maior defeito deste tipo, com largura de 0,54 mm e comprimento de 0,42 mm, e que por sua vez obteve os valores mais baixos de resistência à tração dentre as amostras analisadas. Hou (2014), dissertou a respeito da existência de vazios na região da solda devido ao excesso de rotação, bem como a eliminação do problema ao se utilizar velocidades abaixo de 400 rpm. Estes defeitos

encontrados surgem, em BT-FSW, da combinação entre o calor gerado pela ferramenta e o fluxo de material durante o processo de soldagem. No caso destes dois fatores não serem suficientes para que o material, o qual é retirado de uma posição “X” da amostra, seja substituído por outra porção de material em quantidades semelhantes, serão formados vazios no interior ou na superfície da solda (visíveis a olho nu) que reduzirão a seção resistente a solicitações mecânicas e atuarão como pontos de concentração de tensão.

Dentro deste contexto de que se deve garantir um bom fluxo de material durante a soldagem, para que haja um preenchimento adequado destes espaços a fim de que não sejam formados vazios, chegou-se à conclusão de que a velocidade de soldagem de 200 mm/min é mais eficiente em comparação a de 300 mm/min, pois permite que haja mais tempo de interação entre a ferramenta de soldagem e o material base. Liu (2013) também observou que baixas velocidades (50-200 mm/min) resultaram em melhores juntas. Uma velocidade de soldagem mais lenta proporciona maior transferência de calor da ferramenta, que está em movimento rotacional, para o metal, de forma que o mesmo se plastifique mais, facilitando este preenchimento necessário.

Ao se comparar as amostras BT-25 com a amostra BT-23, observa-se que, em termos de velocidade de rotação da ferramenta de soldagem, 400 rpm é mais eficiente se do que 300 rpm, pois da mesma forma que uma velocidade de soldagem mais baixa, uma maior velocidade de rotação da ferramenta acarretou em maior calor transferido para o metal, aumentando o grau de plastificação deste último, tornando o processo de mistura mais acurado. Curiosamente, a combinação de ambas as velocidades de soldagem e de rotação da ferramenta mais eficientes pode acarretar em um cenário onde muito calor friccional é gerado em função da elevada velocidade de rotação. Em conjunto com a baixa velocidade de soldagem, a distribuição deste calor friccional para o metal ocorre de maneira inadequada, ocasionando o surgimento de defeitos volumétricos macroscópicos internos na zona de mistura. No caso de chapas soldadas, estes defeitos seriam detectáveis apenas com métodos não destrutivos como ultrassom, por exemplo. A Figura 5.1 ilustra micrografias capturadas com o microscópio *Keyence VHX* das seis amostras presentes na Tabela 3.1. As amostras da coluna da direita foram soldadas com velocidade de 200 mm/min e as da esquerda com velocidade de 300 mm/min, 350 mm/min e 400 mm/min (de cima para baixo).

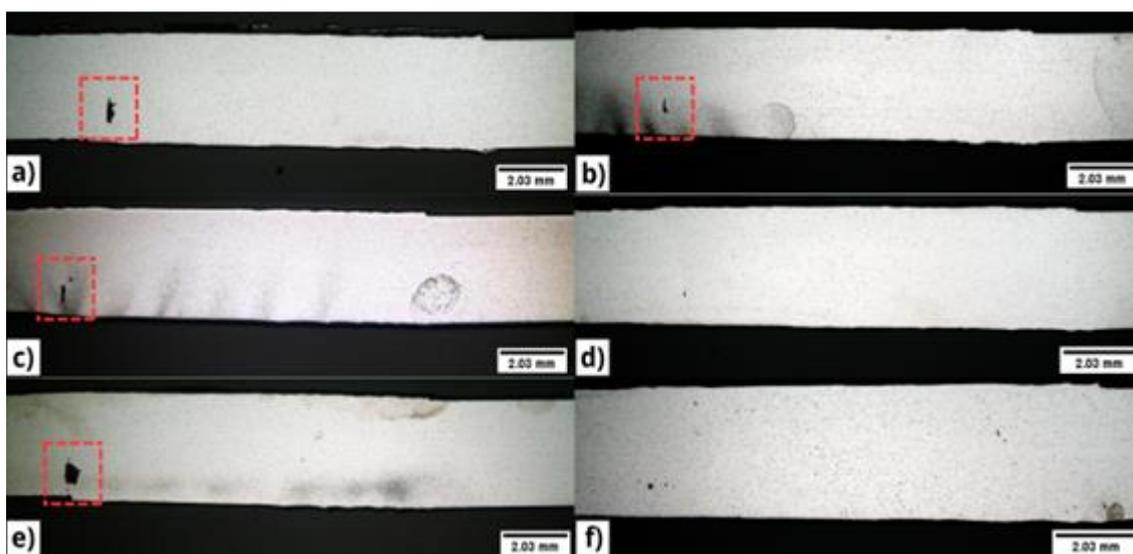


Figura 5.1 - Macrografias das amostras

Legenda: a) BT-20, b) BT-21, c) BT-22, d) BT-23, e) BT-24, f) BT-25.

Fonte: o autor

Por fim, avaliando a influência da força exercida pelos ombros da ferramenta de soldagem sobre a peça soldada, foi inferido que seu papel é crítico e está intimamente ligado com a ocorrência, em maior ou menor magnitude, de defeitos e de rebarbas de solda. Este parâmetro influencia na profundidade a qual os ombros da ferramenta de soldagem, que se encontram nas extremidades da peça, irão penetrar no metal, afetando diretamente o fluxo de material, bem como as condições térmicas de processo e o acabamento final. Portanto, este parâmetro tem efeito direto na qualidade da união soldada. A Tabela 5.3 ilustra a influência da variação da força exercida pelos ombros da ferramenta de soldagem durante o processo, mantendo-se a velocidade da ferramenta em 400 rpm e a velocidade de soldagem em 200 mm/min, e seu impacto na resistência à tração obtidas para duas amostras.

Tabela 5.3 – Influência da variação da força exercida pelos ombros da ferramenta de soldagem na resistência à tração

Amostra n°	Força exercida pelos ombros da ferramenta (N)	Velocidade rotacional da ferramenta (RPM)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Angulação da ferramenta (Eixo Y)	Resistência à tração (MPa)
BT-25	3500	400	200	0	313,7
BT-29	4000	400	200	0	332,9

Fonte: o autor

Conforme ilustra a Tabela 5.3, mantendo-se a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação da ferramenta fixadas, observou-se que o aumento da força exercida pelos ombros da ferramenta de 3500 para 4000N, abaixo dos 5,5 kN utilizados por Entringer (2019), ocasionou um acréscimo de 6,1% no valor de resistência a tração obtido. A Figura 5.2 consiste em micrografias tiradas com o microscópio VXH para as amostras BT-25 (não otimizada) e BT-29 (otimizada).



Figura 5.2 – Defeitos volumétricos

Legenda: a) amostra não otimizada (BT-25) e b) amostra otimizada (BT-29). Radiografia das amostras c) BT-25 e d) BT-29.

Fonte: o autor.

De acordo com os critérios definidos para avaliação da qualidade de uma junta soldada por BT-FSW, citados anteriormente, conclui-se que a amostra BT-29 consiste na solda com os parâmetros otimizados para a liga de alumínio 2219, pois atingiu todos os critérios existentes, apresentando o maior valor referente a resistência à tração, bem como não apresentou quaisquer tipos de defeitos, sejam eles volumétricos ou superficiais, conhecidos do processo.

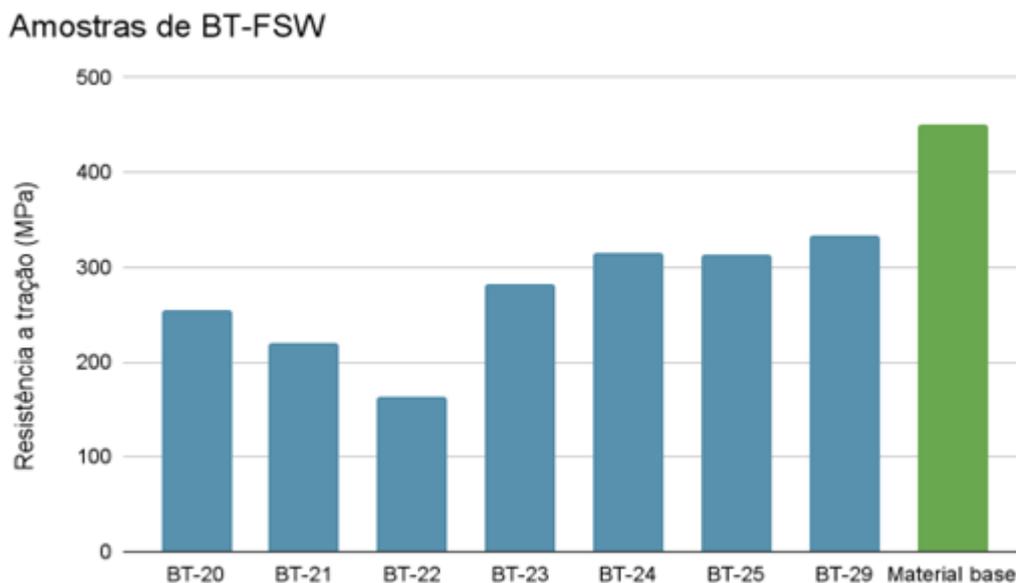


Figura 5.3 – Comparativo das amostras de BT-FSW
Fonte: o autor

5.2 Características microestruturais da técnica BT-FSW

Nas Figuras 5.4 e 5.5, é possível observar a seção transversal de uma amostra de BT-FSW soldada com os parâmetros otimizados. Devido a presença de um ombro superior e outro inferior, ambos rotacionando, durante o processo de soldagem, a zona de mistura (ZM) possui formato de ampulheta, com simetria entre a parte superior e inferior, assim como identificado por Gaohui (2023) e Goebel (2017).



Figura 5.4 – Macrografia de amostra de BT-FSW
Fonte: o autor

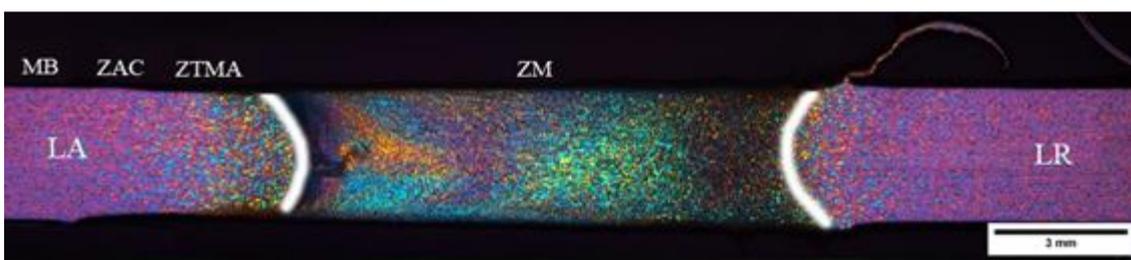


Figura 5.5 – Macrografia polarizada de amostra de BT-FSW
Fonte: o autor

Outro aspecto observável na Figura 5.6 diz respeito ao tamanho de grão médio das quatro diferentes zonas da seção transversal de uma amostra de BT-FSW soldada com os parâmetros otimizados, sendo elas: zona de mistura (ZM) centralizada, zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e pela zona afetada pelo calor (ZAC), e por fim o material base (MB) nas extremidades. A divisão das regiões foi a mesma adotada por Entringer (2019) e Dumpala (2022).

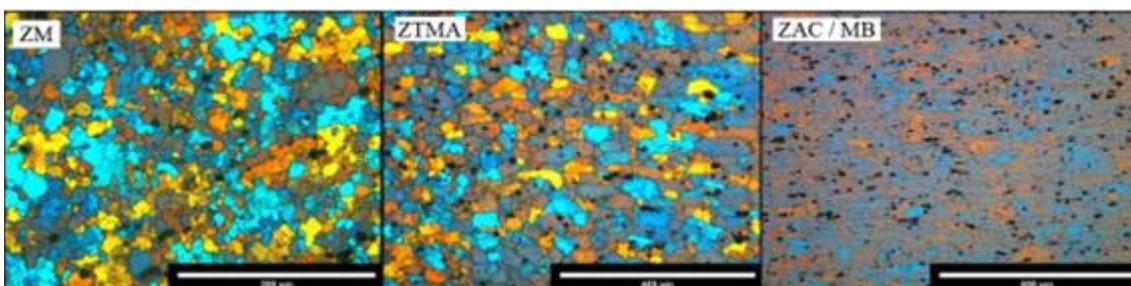


Figura 5.6 – Análise do tamanho do grão na região da solda
Fonte: o autor

O tamanho médio de grão na ZM ficou em $8,66 \mu\text{m}$, um pouco maior do que os $6,6 \mu\text{m}$ encontrados por Entringer (2019) para a liga AA2196. Nesta zona, as taxas de deformação mais elevadas impostas ao material comparado às regiões vizinhas, e as condições térmicas mais severas experimentadas por esta área durante a soldagem promovem um refino de grão. Por outro lado, maiores taxas de deformação, bem como temperaturas mais elevadas, promovem uma maior dissolução dos precipitados existentes originalmente no material.

A Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA) provou ser mais pronunciada no Lado de Avanço (LA) em comparação ao Lado de Retorno (LR), o que pode ser

atribuído às maiores taxas de deformação e gradientes de temperatura experimentados pelo LA devido ao maior fluxo de material no LR e ao cisalhamento da sonda, conforme análise conduzida por Cabibbo (2007). Entretanto, estas deformações e temperaturas observadas não são tamanhas a ponto de causar recristalização do material. Os grãos na ZTMA encontram-se ligeiramente alongados, além de apresentar deformações na vertical, o tamanho médio de grão medido nesta região é de 27,5 μm .

Em relação à morfologia dos grãos na ZAC (Zona Afetada pelo Calor), os mesmos apresentaram formas de panqueca, conforme definido por Wang (2015), característicos de grãos de materiais oriundos do processo de laminação. Considerando que a ZAC sofre consequências apenas processos de caráter térmico, já que nesta região a taxa de deformação é nula, é possível entender o porquê de os grãos nesta área possuírem o mesmo formato dos grãos do material base original que, por sua vez, é laminado. Consequentemente, a determinação da ZAC das amostras só pode ser realizada por testes de dureza. O tamanho médio de grão do material base medido foi de 29,44 μm .

5.3 Fluxo de material característico da técnica BT-FSW

O fluxo de material característico do processo de soldagem por BT-FSW foi analisado a fim de se compreender de que maneira ocorria a formação de defeitos nas amostras. Da mesma forma que ocorre no método de FSW, em BT-FSW, o material sofre um deslocamento causado pela rotação da sonda, no sentido do LR para o LA. Desta maneira, o material plastificado do LA é acumulado com o material à frente da ferramenta em movimento, deslocado pelo movimento da sonda, e é extrudado através do LR para trás da sonda. No lado oposto, os espaços vazios gerados pelo movimento da ferramenta, são preenchidos pelo material plastificado, criando ligações metálicas no LA, fenômeno este que, segundo Entringer (2019), é responsável por criar uma interface mais nítida entre a ZM e a ZTMA.

A partir da análise do fluxo de material nas amostras de BT-FSW, foi observado que os defeitos que ocorrem na zona de mistura (ZM) solda são mais frequentes no LA. Os fatores responsáveis pela ocorrência deste fenômeno são diversos, entre eles: parâmetros do processo não otimizados, presença de impurezas no material base, transporte insuficiente de material de forma que espaços vazios de matéria eram

formados, entre outros. O entendimento de como ocorrem os defeitos mais recorrentes no processo estudado se mostrou um eficiente método de análise para a compreensão do mecanismo característico de transporte de material da técnica de BT-FSW.

Como pode-se observar na Figura 5.7, para o caso da variante convencional de *Bobbin Tool Friction Stir Welding*, caso de estudo deste trabalho, os defeitos, comumente de caráter volumétrico, tendem a se concentrar na região compreendida entre as linhas de fluxo existentes na ZM (aproximadamente na metade da espessura da chapa soldada), induzidas devido a presença de dois ombros rotativos na ferramenta de BT-FSW.



Figura 5.7 – Fluxo de material característico e formação de defeitos

Fonte: o autor

5.4 Propriedades mecânicas das amostras soldadas por BT-FSW

O mapa de dureza para as amostras de BT-FSW após o período de sete dias de envelhecimento natural é ilustrado na Figura 5.8. Foi possível correlacionar as regiões existentes na seção transversal das amostras soldadas com os valores obtidos para a dureza em diversos pontos de medição. A área vermelha do mapa corresponde a porção do material base que não sofreu nenhuma alteração mesmo após o processo de soldagem, portanto, mantendo os valores de dureza esperados para a liga de alumínio 2219-T8. Ao lado da área vermelha comentada anteriormente observa-se uma porção de cor laranja/amarelo, correspondente a ZAC, na qual os valores de dureza são inferiores ao do material base devido ao efeito do calor envolvido no processo de soldagem, que acarreta a dissolução de precipitados e consequente queda nos valores de dureza. A porção verde do mapa representa a ZTMA, onde tanto o calor quanto esforços mecânicos são responsáveis por alterar as propriedades originais do material, porém, sem que ocorra a recristalização do mesmo. Desta forma os valores de dureza encontram-se abaixo dos

encontrados no material base e na ZAC. No centro do mapa (área azul), ocorrem as maiores taxas de aquecimento e deformação, promovendo a recristalização dos grãos ao mesmo tempo que ocorre a dissolução de precipitados, neste ponto, a dureza alcança os menores valores.

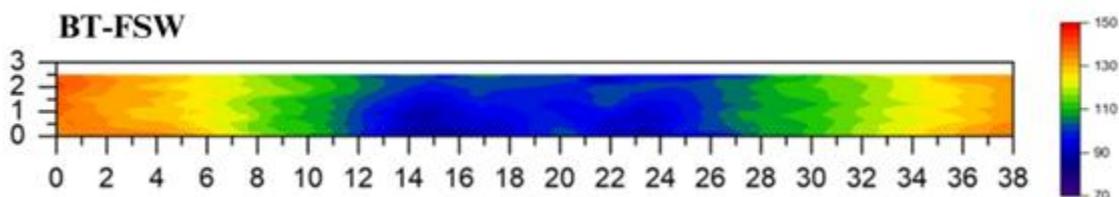


Figura 5.8 – Mapa de dureza para amostra de BT-FSW com parâmetros otimizados
Fonte: o autor

Como comumente observado em ligas de alumínio endurecíveis por envelhecimento, os perfis de microdureza para as amostras de BT-FSW, quando soldadas, exibem uma forma de “U”, assim como relatado por Huijie (2017) e ilustrado na Figura 5.9, onde a linha azul representa a dureza do MB como referência e os pontos pretos representam as medições realizadas na amostra BT-29. Alguns autores como Entringer (2019) e Tao (2017) descrevem o perfil de dureza como tendo uma forma de W, com alguns pontos com dureza mais elevada próximo ao centro da solda, o que não foi observado neste presente estudo. Estas variações observadas nos valores de dureza para diferentes pontos das soldas estão diretamente relacionadas à evolução dos precipitados, uma vez que a dureza é sensível à microestrutura do material. Ao se correlacionar os valores de dureza com as regiões existentes na solda, é possível constatar que a dissolução dos precipitados consiste no principal fator responsável pela redução da dureza na ZAC, ZTMA e ZM.

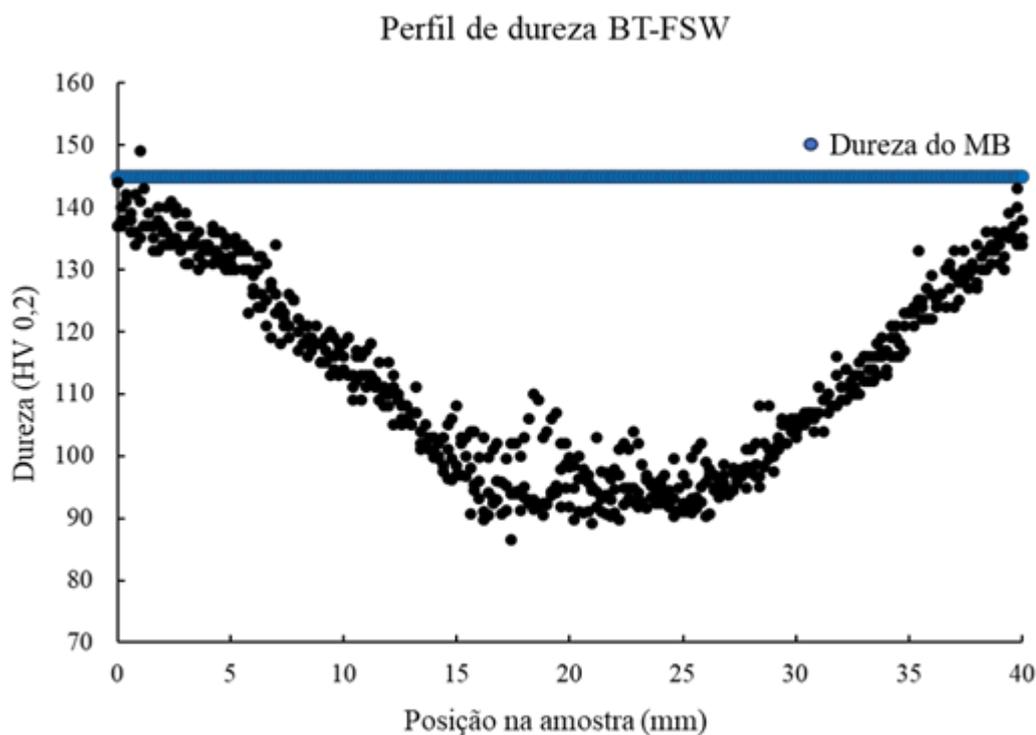


Figura 5.9 – Perfil de dureza para amostra de BT-FSW

Fonte: o autor

Conforme discutido no Capítulo 3.2.1, o sistema binário Al-Cu contribui para a formação das zonas GP, seguido pela formação das fases θ' e T_1 (precipitado mais importante, responsável pelo acréscimo de resistência mecânica). De acordo com Entringer (2019), temperaturas próximas a 480°C são atingidas na ZM, desta forma grande parte dos precipitados T_1 são dissolvidos no caso da liga AA2060. Geuser (2014) relatou a dissolução completa da fase T_1 à medida que a temperatura desta região da solda excedeu 450°C . Desta forma é compreensível o menor valor de dureza encontrado na ZM de 94.2 HV, aproximadamente 65% da dureza do material base, um pouco abaixo dos 77% atingidos por Goebel (2017) e por Esmaily (2016). Entretanto, o mecanismo de formação dos precipitados bem como o efeito do tempo e da temperatura sobre os mesmos necessita de mais estudos a fim de serem completamente entendidos.

Em termos de resistência à tração, foram avaliadas as amostras soldadas utilizando uma combinação ótima de parâmetros. Neste cenário, a ruptura da amostra de BT-FSW ocorreu com uma tensão de 332.9 MPa, o que consiste em 73,2% da tensão de ruptura da liga de alumínio 2219-T8 (material base), valor superior aos 70% obtidos por Entringer (2019) e Quen (2019) e próximo dos 71,9% obtidos por Esmaily (2016). Os

resultados bastante satisfatórios provenientes da análise das amostras soldadas por BT-FSW com parâmetros otimizados frente as propriedades do material base (acima do que se esperaria se as mesmas tivessem sido soldadas por métodos convencionais de soldagem), se em grande parte ao refino dos grãos do material soldado, o que afeta positivamente as propriedades mecânicas através do fortalecimento nos contornos de grão. Os contornos de grãos atuam como barreiras, dificultando a propagação de defeitos e trincas. As partículas de segunda fase, por sua vez, promovem distorções na rede cristalina, condição esta que acaba atraindo as discordâncias do material para os precipitados, o que acarreta em um acréscimo nos valores de dureza e resistência mecânica do material.

A Figura 5.10 ilustra curva tensão deformação para o material base e para a amostra otimizada BT-29:

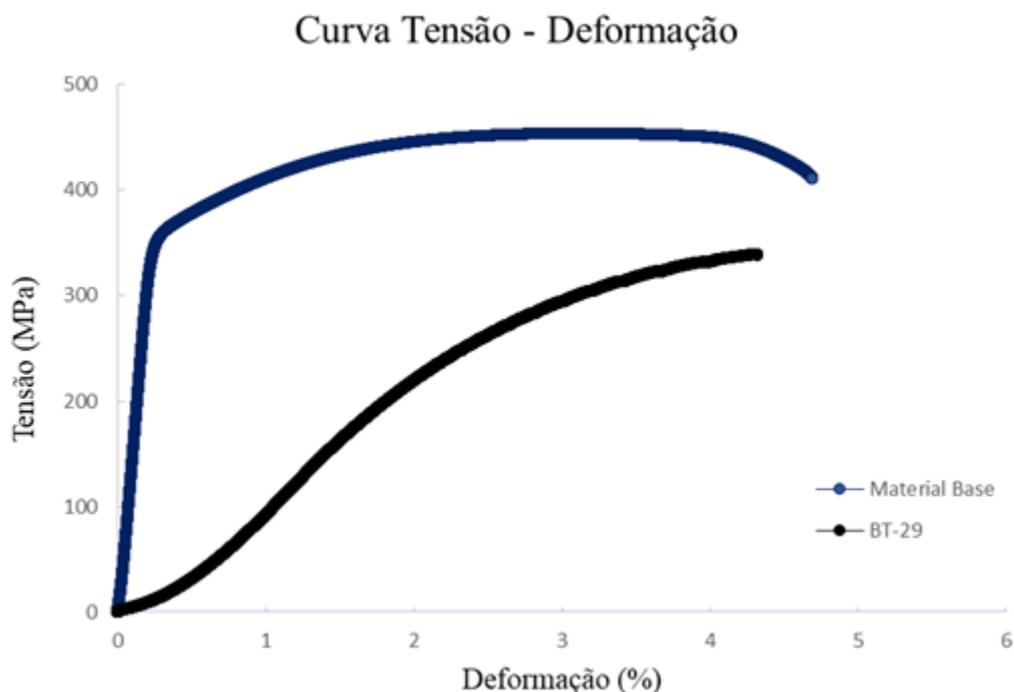


Figura 5.10 - Curva de Resistência à tração x Deformação para amostra BT-29 e MB
Fonte: o autor

A análise da fratura após o teste de tração pode ser conduzida. Para uma amostra de BT-FSW, com parâmetros otimizados, a fratura se deu no Lado de Avanço (LA) da ferramenta de soldagem, indicando que, como discutido anteriormente, as condições

térmicas e a deformação mais elevada, contribuem para diferenças na morfologia dos grãos que, conseqüentemente, formam zonas mais fragilizadas no LA. As fraturas observadas exibiram um modo de cisalhamento com um ângulo de 45° em relação à espessura da amostra, exatamente como relatado por Carvalho (2020), Entringer (2019) e Goebel (2017). Como fica evidente na Figura 5.11, a fratura ocorreu na interface entre a ZM e ZTMA. Para maior entendimento acerca do mecanismo de ruptura se faz necessário futuras investigações.

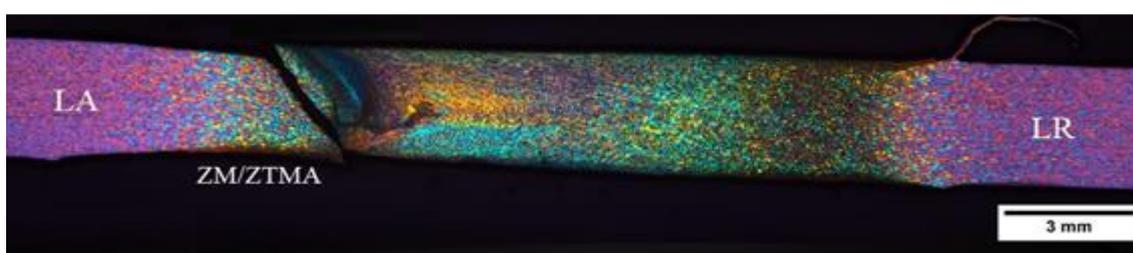


Figura 5.11 - Modo de ruptura por tração em amostra de BT-FSW

Fonte: o autor

5.5 Acabamento superficial das amostras soldadas por BT-FSW

A análise do acabamento superficial da amostra de BT-FSW com parâmetros otimizados realizada por meio do perfilômetro digital Keyence VR Series é apresentada na Figura 5.12. Como pode-se observar, há uma leve formação de rebarbas no topo da chapa soldada, facilmente removível manualmente, porém consiste em um ponto com potencial de melhorias. Na superfície inferior, o acabamento é excelente, sem formação de rebarbas ou rugosidades acentuadas.

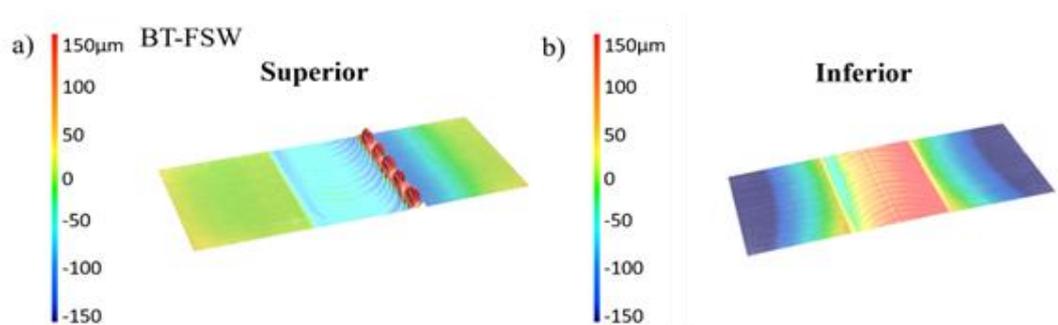


Figura 5.12 - Análise perfilométrica em amostra otimizada de BT-FSW

Fonte: o autor

6.0 CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos e a otimização de parâmetros de soldagem para o método de soldagem por fricção para a liga de alumínio 2219-T8, conclui-se que:

- a) os três parâmetros-chave identificados para a obtenção de soldas sem defeitos, com propriedades mecânicas elevadas e com acabamento superficial de qualidade são: velocidade de soldagem, velocidade de rotação da ferramenta e força aplicada pelos ombros da ferramenta. Dentre a faixa de parâmetros estudada, a combinação de 200 mm/min, 350 rpm e 4 kN, respectivamente, foi a que resultou nas melhores juntas soldadas. Estes três fatores devem ser ajustados de maneira conjunta e não individualmente para que se atinja o padrão de solda desejado;
- b) a análise dos defeitos, bem como o estudo do fluxo durante o processo, revelou que os defeitos mais recorrentes para a técnica de BT-FSW consistem em defeitos volumétricos (vazios) oriundos do aporte térmico insuficiente ou demasiado. Em ambos os casos, tanto o nível de plastificação como o fluxo do material durante o processo não serão os ideais e irão formar vazios por falta de preenchimento. Quando formados na superfície da região soldada podem ser removidos por processos de usinagem, não causando grandes preocupações. Maior risco são os defeitos volumétricos internos, difíceis de detectar, e potenciais causadores de falhas catastróficas do componente;
- c) defeitos microestruturais na região soldada podem vir a ocorrer caso os parâmetros de processo não sejam otimizados, causando dissolução excessiva dos precipitados característicos de ligas de alumínio, conseqüentemente, acarretando em redução das propriedades mecânicas do componente;

- d) as amostras de BT-FSW otimizadas apresentaram resistência à tração em nível bastante satisfatório, atingindo 73,1% do valor médio do material base (liga 2219-T8). A partir dos resultados pode se concluir que, devido ao ciclo termomecânico ao qual o LA é submetido, bem como diferenças microestruturais, este possui uma ligação mais fraca em comparação com o LR.

Em termos gerais a técnica de soldagem por fricção do tipo BT-FSW se mostrou uma alternativa promissora para aplicações em diversas áreas industriais, especialmente na fabricação de componentes aeroespaciais empregando ligas leves, podendo vir a ser uma excelente alternativa na redução das emissões de dióxido de carbono nos próximos anos.

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados apresentados no presente estudo, juntamente com as alternativas existentes para a técnica de soldagem do tipo BT-FSW, propõem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) aplicar os parâmetros de processo do método BT-FSW para outras ligas que não a estudada neste trabalho, otimizando-os caso seja necessário;
- b) estudar a resistência à corrosão das amostras soldadas com os parâmetros de processo otimizados neste presente trabalho;
- c) avaliar o efeito da variante semi-estacionária para BT-FSW, onde apenas um dos dois ombros da ferramenta rotaciona, aspecto este que pode vir a ser um trunfo para a melhoria do acabamento superficial do componente soldado;
- d) avaliar as amostras soldadas com os parâmetros otimizados para BT-FSW em fadiga;

8.0 REFERÊNCIAS

- ANDERSON-WEDGE, K.; AVERY, D. Z.; DANIEWICZ, S. R.; SOWARDS, J. W.; ALLISON, P. G.; JORDON, J. B.; AMARO, R. L. Characterization of the Fatigue Behavior of Additive Friction Stir-deposition AA2219. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 142, p. 105951, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105951>>. Acesso em: 29 out. 2024.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E112-13**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/E0112-13R21>>. Acesso em: 29 set. 2024.
- CABIBBO, M.; MCQUEEN, J.; EVANGELISTA, E.; SPIGARELLI, S.; DI PAOLA, M.; FALCHERO, A. Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate. **Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 460–461, p. 86-94, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.022>>. Acesso em: 29 out. 2024.
- CARDARELLI, F. **Materials Handbook**: A Concise Desktop Reference. Springer London, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-669-8>>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- CARVALHO, Joana Amaral de. **Influence of Bobbin Tool Friction Stir Welding (BT-FSW) variants on the microstructure and properties of AA2060 and AA2196 aluminum alloys**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13367>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- COMISSÃO EUROPEIA - EC. **Energy, climate, environment. Climate Action**. EU action. International action on climate change. Climate negotiations. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- DAVIS, J. R. **Metals Handbook Desk Edition**. [s. l.]: ASM International, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- DONNADIEU, P.; SHAO, Y.; GEUSER, F. De; BOTTON, G. A.; LAZAR, S.; CHEYNET, M.; BOISSIEU, M. de; DESCHAMPS, A. Atomic structure of T1 precipitates in Al–Li–Cu alloys revisited with HAADF-STEM imaging and small-angle X-ray scattering. **Acta Materialia**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 462-472, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.044>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

DOULGERIS, Georgios; TOURE, Maelenn; KALFAS, Anestis; PILIDIS, Pericles. Effect of Utilization Strategy on Greenhouse Emissions of a Short Haul Aircraft. **Journal of Environment and Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 431-443, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1299/jee.5.431>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DUMPALA, L.; CHANDRA, P. Harsha; SRIRAM, N. Development of bobbin tool and influence of its design parameters on FSW joint. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 56, p. 1582-1587, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.363>>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ENTRINGER, Jannik. **Microstructure evolution and stress corrosion cracking behavior in short-term thermomechanically processed Al-Cu-Li alloys**. 2019. Tese de doutorado, Technische Universität Hamburg. Hamburgo, Alemanha, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.15480/882.2390>>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ESMAILY, M.; MORTAZAVI, N.; OSIKOWICZ, W.; HINDSEFELT, H.; SVENSSON, J. E.; HALVARSSON, M.; MARTIN, J.; JOHANSSON, L. G. Bobbin and conventional friction stir welding of thick extruded AA6005-T6 profiles. **Materials & Design**, [s. l.], v. 108, p. 114-125, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.089>>. Acesso em: 19 out. 2024.

FUSE, K.; BADHEKA, V. Bobbin tool friction stir welding: a review. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 24, n. 4, p. 277-304, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1553655>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

GAO, Z.; LIU, J. Z.; CHEN, J. H.; DUAN, S. Y.; LIU, Z. R.; MING, W. Q.; WU, C. L. Formation mechanism of precipitate T₁ in AlCuLi alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 624, p. 22-26, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.208>>. Acesso em: 30 out. 2024.

GAOHUI, L.; CHEN, Ting; FU, Banglong; SHEN, Junjun; BERGMANN, Luciano; ZHOU, Li; CHEN, Ke; SANTOS, Jorge F. dos; KLUSEMANN, Benjamin. Semi-stationary shoulder bobbin-tool: A new approach in tailoring macrostructure and mechanical properties of bobbin-tool friction stir welds in magnesium alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 317, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117984>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

GAUSER, F.; MALARD, B.; DESCHAMPS, A. Microstructure mapping of a friction stir welded AA2050 Al-Li-Cu in the T8 state. **Philosophical Magazine**, [s. l.], v. 94, n. 13, p. 1451-1462, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14786435.2014.887862>>. Acesso em: 19 out. 2024.

GOEBEL, Jannik; REIMANN, Martin; NORMAN, Andrew; SANTOS, Jorge F. Dos. Semistationary Shoulder Bobbin Tool Friction Stir Welding of AA2198-T851. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], n. 245, p. 37-45, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.011>>. Acesso em: 05 nov. 2024.

HERTWICH, Edgar G.; ALI, Saleem; CIACCI, Luca; FISHMAN, Tomer; HEEREN, Niko; MASANET, Eric; ASGHARI, Farnaz Nojavan; OLIVETTI, Elsa; PAULIUK, Stefan; TU, Qingshi; WOLFRAM, Paul. Material Efficiency Strategies to Reducing Greenhouse Gas Emissions Associated with Buildings, Vehicles, and Electronics-a Review. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v 14, n. 4, p. 43004, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0fe>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HILGERT, J. **Knowledge Based Process Development of Bobbin Tool Friction Stir Welding**. Technische Universität Hamburg. Hamburgo, Alemanha, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.15480/882.1069>>. Acesso em: 10 set. 2024.

HOU, J. C.; LIU, H. J.; ZHAO, Y. Q. Influences of rotation speed on microstructures and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy joints fabricated by self-reacting friction stir welding tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, p. 1073–1079, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5857-9>>. Acesso em: 13 nov. 2024.

HOWE, J. M.; LEE, J.; VASUDÉVAN, A. K. Structure and deformation behavior of T 1 precipitate plates in an Al₂Li₁Cu alloy. **Metallurgical Transactions A**, [s. l.], v. 19, n. 12, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02647717>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

HUERTA, E.; OLIVA, A. I.; AVILÉS, F.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J.; CORONA, J. E. Elastic Modulus Determination of Al-Cu Film Alloys Prepared by Thermal Diffusion. **Journal of Nanomaterials**, [s. l.], 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2012/895131>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

HUIJIE, L.; HU, Yanying; DOU, Chao; SEKULIC, Dusan P. An effect of the rotation speed on microstructure and mechanical properties of the friction stir welded 2060-T8 Al-Li alloy. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 123, p. 9-19, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.011>>. Acesso em: 17 out. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6892-1:2019**: Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. 2019a. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/78322.html>>. Acesso em: 29 set. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 643 (2019)**: Steels — Micrographic determination of the apparent grain size. 2019b. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/72193.html>>. Acesso em: 29 set. 2024.

KUHN, Peter M. Airborne observations of contrail effects on the thermal radiation budget. **Journal of Atmospheric Sciences**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 937-942, 1970. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1970\)027](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1970)027)>. Acesso em 14 nov. 2024.

LEE, David S.; FAHEY, David W.; FORSTER, Piers M.; NEWTON, Peter J.; WIT, Ron C. N.; LIM, Ling L.; OWEN, Bethan; SAUSEN, Robert. Aviation and Global Climate Change in the 21st Century. **Atmospheric Environment** [s. l.], v. 43, n. 22, p. 3520-537, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LI, Shuang-Shuang; YUE, Xin; LI, Qing-Yuan; PENG, He-Li; DONG, Bai-Xin; LIU, Tian-Shu; YANG, Hong-Yu; FAN, Jun; SHU, Shi-Li; QIU, Feng; JIANG, Qi-Chuan. “development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 27, p. 944-983, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>>. Acesso em: 29 out. 2024.

LI, Z.; SHI, Yi-Long; XU, Luo-Peng; JIN, Jia-Xin. Effect of Natural Aging on Cold Forming Performance of 2219 Aluminum Alloy. **Materials**, [s. l.], v. 16, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma16093536>>. Acesso em: 30 nov. 2024.

LIU H, J.; HOU, J. C.; GUO, H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy. **Materials & Design**, [s. l.], v. 50, p. 872-878, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.105>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MALARVIZHI, Sudersenan; BALASUBRAMANIAN, Visvalingam. Influences Of Welding Processes And Post-Weld Ageing Treatment On Mechanical And Metallurgical Properties Of AA2219 Aluminium Alloy Joints. **Welding in the World**, [s. l.], v. 56, n. 9-10, p. 105-19, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF03321386>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

NOBLE, B.; THOMPSON, G. E. T 1 (Al₂CuLi) Precipitation in Aluminium-Copper-Lithium Alloys. **Metal Science Journal**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 167-174, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/030634572790445975>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

PADHY, G. K.; WU, C. S.; GAO, S. Friction Stir Based Welding and Processing Technologies - Processes, Parameters, Microstructures and Applications. A Review. **Journal of Materials Science & Technology**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 1-38, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.029>>. Acesso em: 18 nov. 2024.

PALBAIJAN, I.; AHMED, M. M. Z.; EL-SAYED, Seleman M. M.; TOUILEB, K.; HABBA, M. I. A.; FOUAD, R. A. Optimization of Bobbin Tool Friction Stir Processing Parameters of AA1050 Using Response Surface Methodology. **Materials (Basel)**, [s. l.], v. 15, n. 19, p. 6886, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15196886>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

PERES-CALDERÓN, E.; MILANÉS-MONTERO, Patricia; GUTIÉRREZ-PÉREZ, Cristina. Climate change, where do we come from and where are we going?. **European aviation sector behavior, Transport Policy**, [s. l.], v. 114, p. 40-48, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.09.003>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

QUEN, W.; LI, W.; PATEL, V. et al. Investigation on the Effects of Welding Speed on Bobbin Tool Friction Stir Welding of 2219 Aluminum Alloy. **Met. Mater. Int.**, [s. l.], v. 26, p. 1830–1840, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00450-9>>. Acesso em: 12 out. 2024.

REINKING, R. Insolation reduction by contrails. **Weather**, [s. l.], v. 23, n. 4, 1968. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1968.tb07369.x>>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ROMÁN, Alejandra S.; MÉNDEZ, Claudia M.; GERVASI, Claudio A.; REBAK, Raúl B.; ARES, Alicia E. Corrosion Resistance of Aluminum-Copper Alloys with Different Grain Structures. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 131-44, 2021. Disponível em: <<https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11665-020-05344-1>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SAKAI, Taku; BELYAKOV, Andrey; KAIBYSHEV, Rustam; MIURA, Hiromi; JONAS, John J. Dynamic and Post-dynamic Recrystallization under Hot, Cold and Severe Plastic Deformation Conditions. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 60, p. 130-207, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>>. Acesso em 17 nov. 2024.

SAMBASIVAM, S.; GUPTA, Nakul; JASSIM, Ali Saeed; SINGH, Durgeshwar Pratap; KUMAR, Sandeep; GIRI, Jitendra Mohan; GUPTA, Manish. A review paper of FSW on dissimilar materials using aluminum. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.304>>. Acesso em: 30 nov. 2024.

SCOTTI, D.; VOLTA, N. An empirical assessment of the CO₂-sensitive productivity of European airlines from 2000 to 2010. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 37, p. 137-149, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.009>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SHAO, M.; WANG, Caimei; ZHANG, Hua; ZHANG, Jian; LIU, Debo; WANG, Feifan; JI, Yajuan; CHEN, Gaoqiang. Microstructure and corrosion behavior of bobbin tool friction stir welded 2219 aluminum alloy. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 192, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112178>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SHARMA, V. M. J.; KUMAR, K. Sree; RAO, B. Nageswara; PATHAK, S. D. Studies on the Work-Hardening Behavior of AA2219 under Different Aging Treatments. **Physical Metallurgy and Materials Science**, [s. l.], v. 40, n. 13, p. 3186-3195, 2009. Disponível em: <<https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11661-009-0062-4>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

STARKE, E.; STALEY, J. Application of modern aluminum alloys to aircraft. **Prog Aero Sci**, [s. l.], v. 32, n. 2–3, p. 131-172, 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SURESH, M.; KALSAR, R.; MORE, A.; BISHT, A.; NAYAN, N.; SUWAS, S. Evolution of microstructure and texture in the third generation Al–Li alloy AA2195 during warm hybrid processing. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 855, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156750>>. Acesso em: 28 out. 2024.

TAO, Y.; NI, D. R.; XIAO, B. L.; MA, Z. Y.; WU, W.; ZHANG, R. X.; ZENG, Y. S. Bobbin tool friction stir welding: a review. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], p. 1-13, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.079>>. Acesso em: 29 out. 2024.

VOROBYOV, E. V.; STRYZHALO, V. O.; ZEMTSOV, M. P.; ANPILOGOVA, T. V.; BABENKO, R. G.; BOLTASOV, S. V. Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219 and Its Welded Joints at Cryogenic and Elevated Temperatures. **Strength of Materials**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 216-221, 2022. Disponível em: <<https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11223-022-00402-6>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

XIAO, Yanping; REUTER, Markus A.; BOIN, Udo. Aluminium Recycling and Environmental Issues of Salt Slag Treatment. **Journal of Environmental Science and Health**, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 1861-875, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10934520500183824>>. Acesso em: 30 out. 2024.

XIE, Yuming; MENG, Xiangchen; WANG, Feifan; JIANG, Yimeng; MA, Xiaotian; WAN, Long; HUANG, Yongxian. Insight on Corrosion Behavior of Friction Stir Welded AA2219/AA2195 Joints in Astronautical Engineering. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 192, p. 109800, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109800>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

YADAV, M. Kumar; ARORA, K.; KUMAR, S.; KUMAR, A. Micro-hardness evaluation of the bobbin tool-friction stir welded AA6063 using regression-based machine learning. **Materials Letters**, [s. l.], v. 349, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134751>>. Acesso em: 29 nov. 2024.

WANG, H. Z.; LEUNG, D. Y. C.; LEUNG, M. K. H.; NI, M. A Review on Hydrogen Production Using Aluminum and Aluminum Alloys. **Renewable & Sustainable Energy Reviews** [s. l.], v. 13, n. 4, p. 845-853, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.009>>. Acesso em: 19 out. 2024.

ZHOU, L.; LI, G. H.; LIU, C. L. et al. Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 89, p.

3509–3516, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9318-5>>. Acesso em: 29 out. 2024.