

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL



OCLAVIO COUTINHO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE JUNTAS DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075 SOLDADAS
PELO PROCESSO FSW

Cajazeiras
2020

OCLAVIO COUTINHO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO, AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE LIGA DE ALUMÍNIO
7075 SOLDADAS PELO PROCESSO FSW

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Tecnologia em
Automação Industrial do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como
parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Tecnólogo em Automação Industrial

Orientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo

Cajazeiras
2020

Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S237c

Santos, Oclavio Coutinho dos

Caracterização e avaliação das propriedades mecânicas de juntas de liga de alumínio 7075 soldadas pelo processo FSW / Oclavio Coutinho dos Santos; orientador Raphael Henrique Falcão de Melo.- 2021.

46 f. : il.

Orientador: Raphael Henrique Falcão de Melo.

TCC(Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

1. Alumínio 2. Juntas de alumínio - Propriedades mecânicas 3. Friction Stir Welding – FSW 4. Soldagem I. Título

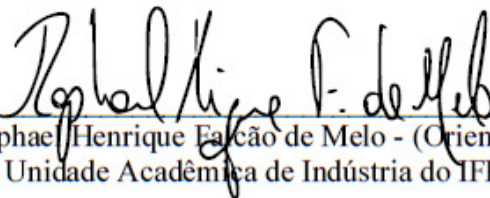
CDU 669.71(0.067)

OCLÁVIO COUTINHO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO, AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE LIGA DE ALUMÍNIO
7075 SOLDADAS PELO PROCESSO FSW

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Tecnologia em Automação Industrial do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Tecnólogo em Automação Industrial

BANCA EXAMINADORA



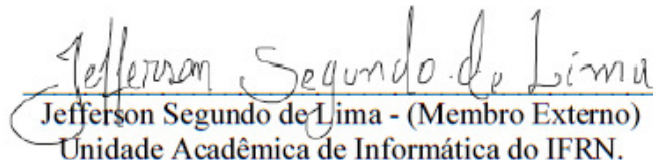
Raphael Henrique Falcão de Melo - (Orientador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB



Austriclinio da Costa Wanderley Neto - (Coorientador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB

Luan Carvalho Santana de Oliveira

Luan Carvalho Santana de Oliveira - (Membro)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.



Jefferson Segundo de Lima - (Membro Externo)
Unidade Acadêmica de Informática do IFRN.

Cajazeiras, 04 de Dezembro de 2020.

DEDICATÓRIA

Dedico em primeiro lugar a Deus que sem ele nada, absolutamente nada é possível e ao mesmo tempo tudo é possível assim ele queira, e ele sempre quis minha vitória e me concedeu todas as ferramentas necessárias para isso.

Em segundo dedico este trabalho aos meus pais, Sr. Olávio que é um exemplo de pai e desde minha infância vem mostrando como ser um homem honesto e fiel aos meus ideais, Sra. Fabiana que além de uma mãe dedicada, transbordando amor é uma mulher guerreira e não se deixa abater por nada e assim me mostra que é desse jeito que se vence na vida. Eles e sempre serão os moldes que forjaram o homem que sou hoje, dedico também a todos meus familiares que sempre estavam de prontidão para me ajudar.

Aos meus irmãos, Flaviana e Andreson que são meus pés e mãos.

Dedico também a minha namorada Giovana que sempre está ao meu lado me apoiando e me mantendo de cabeça erguida, nela encontrei o que sempre desejei em uma companheira.

Meu orientador Raphael Henrique que abriu as portas para mim me aceitando como bolsista, orientando e amigo e sempre me guiando nessa jornada, se estivéssemos em Senhor dos anéis eu seria o Frodo e ele o Gandalf.

A Jefferson Segundo que me deu todo suporte que um amigo e colega de projeto poderia dar, seguindo a analogia anterior ele seria o Sam.

A Luciano e Walter que estava sempre de prontidão para me ajudarem.

A meus amigos que desde o ensino médio/técnico me acompanham, Joao Victor, Aldemir, Jefferson e Michely.

E a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento.

Tudo Tem seu Tempo. (Ec. 3:1)

SANTOS, Oclávio Coutinho dos. **Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de alumínio 7075 soldadas pelo processo FSW.** 2020. xx f. Trabalho de Conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial – Instituto Federal da Paraíba. Cajazeiras - PB.

RESUMO

A crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade, aliada à redução do consumo e preservação do meio ambiente por meio da reciclagem de materiais, faz com que o uso do alumínio venha experimentando um crescimento constante nas indústrias automotiva, naval e aeronáutica, bem como a combinação de baixa densidade, alta resistência à corrosão, boa tenacidade, excelente conformabilidade e reciclabilidade garantem seu uso em escala industrial. A soldagem é o principal processo de fabricação empregado na confecção de componentes de geometria complexa em ligas de alumínio. Porém, a soldagem de ligas de alumínio por processos de soldagens convencionais de fusão, requer vários cuidados, pois tem efeitos colaterais e esses cuidados é a fim de evitar a perda de propriedades mecânicas provenientes do coalescimento dos grãos, formação de estruturas grosseiras, distorção e alto nível de tensão residuais, entre outros defeitos ligados a solidificação. Em especial, as ligas de alumínio da série 7XXX apresentam pior soldabilidade, devido principalmente ao fenômeno de superenvelhecimento e crescimento excessivo de precipitados, que fragiliza a junta soldada. O processo de soldagem por fricção é uma opção para superar essas dificuldades de soldagem, sendo um dos processos de soldagem no estado sólido mais utilizados o *Friction Stir Welding* (FSW). No entanto, esse processo possui diversas variáveis que influenciam o desempenho da junta soldada como a velocidade de rotação da ferramenta, geometria da ferramenta, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da ferramenta, força axial e entrada do ombro da ferramenta. Assim, é necessário um estudo prospectivo para obter parâmetros de soldagem adequados. Portanto, esse trabalho tem como finalidade produzir juntas do alumínio 7075 através do processo de soldagem FSW e analisar a qualidade das juntas soldadas através de ensaios mecânicos.

Palavras-Chave: Alumínio; Propriedades Mecânicas; FSW; soldagem.

SANTOS, Oclávio Coutinho dos. **Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de alumínio 7075 soldadas pelo processo FSW.** 2020. xx f. Trabalho de Conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial – Instituto Federal da Paraíba. Cajazeiras - PB.

ABSTRACT

The growing demand for products of higher quality and durability, combined with reduced consumption and preservation of the environment through the recycling of materials, means that the use of aluminum has been experiencing a constant growth in the automotive, naval and aeronautical industries, as well as the combination of low density, high corrosion resistance, good toughness, excellent formability and recyclability guarantee its use on an industrial scale. Welding is the main manufacturing process used to make complex geometry components in aluminum alloys. However, the welding of aluminum alloys by conventional fusion welding processes, requires several precautions, as it has side effects and this care is in order to avoid the loss of mechanical properties resulting from the coalescence of the grains, formation of coarse structures, distortion and high residual stress level, among other defects linked to solidification. In particular, the aluminum alloys of the 7XXX series have poorer weldability, mainly due to the phenomenon of over-aging and excessive growth of precipitates, which weakens the welded joint. The friction welding process is an option to overcome these welding difficulties like *Friction Stir Welding* (FSW). However, this process has several variables that influence the performance of the welded joint such as the tool rotation speed, tool geometry, welding speed, tool tilt angle, axial force and tool shoulder entry. Thus, a prospective study is necessary to obtain adequate welding parameters. Therefore, this work aims to produce 7075 aluminum joints through the welding process (FSW), to analyze the quality of the welded joints through mechanical tests.

Keywords: Aluminum; Mechanical Properties; FSW; welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: classificação dos processos de soldagem.....	20
Figura 2: Ferramenta do Processo FSW e parâmetros do processo respectivamente.....	21
Figura 3: Diferentes geométricas de pino para ferramenta FSW, triangular (a), quadrado (b), hexagonal (c), cilíndrica roscada de 6 mm (d), 8 mm (e), e 10 mm (f).....	22
Figura 4: (a) Aço H13, (b) Ferramenta confeccionada, (c) ferramenta após a tempera.....	23
Figura 5: Ferramenta FSW: (a) confeccionada e (b) dimensões de projeto (em ‘mm’)	23
Figura 6: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat.....	24
Figura 7: Fixação das chapas na fresadora.....	24
Figura 8: Fixação de corpo de prova para ensaio de tração uniaxial em garras da máquina universal de ensaios MTS, modelo 810.....	25
Figura 9: Dimensões especificadas para amostra de ensaio de tração (em ‘mm’)	26
Figura 10: Representação da posição retirada de corpos de prova e da região da solda nas juntas soldadas por FSW (dimensões em ‘mm’)	26
Figura 11: Representação de distribuição das indentações de microdureza (dimensões em ‘mm’)	27
Figura 12: Vista superficial da Junta soldada 1.....	28
Figura 13: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 1.....	31
Figura 14: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 2.....	31
Figura 15: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 3.....	32
Figura 16: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 4.....	32
Figura 17: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 5.....	33
Figura 18: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 6.....	33

Figura 19: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 7.....	34
Figura 20: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 8.....	34
Figura 21: Perfis transversais de microdureza vickers das juntas soldadas 9, 10 e 11, correspondentes a combinação de parâmetros de ponto central.....	35
Figura 22: Curva tensão-deformação das juntas soldadas (JS) e Material base (MB).....	37
Figura 23: Curva tensão-deformação das juntas soldadas (JS) de ponto central e Material base (MB).....	37

LISTA TABELAS

Tabela 1: Ligas de alumínio pela classificação da ABNT NBR 6834.....	17
Tabela 2: Teores mínimos de elementos de liga que uma liga da série 7XXX deve apresentar.....	19
Tabela 3: Parâmetros de soldagem.....	25
Tabela 4: Cordões de solda das diferentes juntas soldadas.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS

AA – Alumínium Association;

FSW - Friction Stir Welding;

Al – Alumínio

Zn – Zinco

TWI – The welding institute

Cu – Cobre

Mn – Manganês

Cr – Cromo

Si – Silício

Mg – Magnésio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for testing and materials

MMC – Máquina de medir coordenadas

LISTA DE SÍMBOLOS

@ - arroba

© - copyright

® - marca registrada

°C – graus celsius

w – rotação

d₃ - Ferramenta

v – Avanço

α – Ângulo de ataque

F₃ - Força axial

ϵ – Deformação

t – Tensão

Pa – Pascal

E – Modulo de elasticidade

V – Razão de Poisson

ϵ_x – Deformação na direção da soldagem

ϵ_y – Deformação na direção da deformação nominal linha de solda

n – Velocidade de rotação da ferramenta

f – Velocidade de avanço da ferramenta

a – Ângulo de inclinação da ferramenta

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRAT	5
LISTA DE ILUSTRACAO	6
LISTA DE TABELA.....	8
LISTA DE ABREVIATURA.....	9
LISTA DE SIMBOLOS.....	10
1 INTRODUCAO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	15
3.1 ALUMINIO E SUAS LIGAS.....	15
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMINIO.....	16
3.3 LIGA DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 7XXX.....	18
3.4 SOLDAGEM.....	19
3.5.1 Friction stir welding.....	20
4 METODOLOGIA.....	23
4.1 PREPARACAO DO METAL BASE.....	23
4.2 CONFECÇÃO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM.....	23
4.3 CONFECÇÃO DAS JUNTAS.....	24
4.3.1 Ensaio mecânico de tração uniaxial.....	24
4.3.2 Ensaio mecânico de microdureza vickers.....	26
5 RESULTADOS E DISCURSOES.....	27

5.1. Perfis de Microdureza.....	29
5.2. Resistencia a Tração.....	36
6 CONCLUSAO.....	38
7 REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade, aliada à redução do consumo e preservação do meio ambiente por meio da reciclagem de materiais, faz com que o uso do alumínio venha experimentando um crescimento constante nas indústrias automotiva, naval e aeronáutica, bem como a combinação de baixa densidade, alta resistência à corrosão, boa tenacidade, excelente conformabilidade e reciclabilidade garantem seu uso em escala industrial. Além disso, o alumínio pode ser combinado com uma ampla gama de outros elementos de liga, permitindo a otimização de propriedades, ampliando ainda mais sua aplicabilidade (DAVIS, 2001).

Entre os vários tipos de ligas de alumínio, as ligas Al - Zn (série 7XXX), endurecidos por precipitação, são as mais utilizadas na indústria aeronáutica, pois oferecem uma excelente relação entre peso e alta resistência mecânica (CAVALIERE, 2013; ZAMAN et al., 2017).

A soldagem é o principal processo de fabricação empregado na confecção de componentes de geometria complexa em ligas de alumínio. No entanto, a soldagem de ligas de alumínio por processos convencionais de soldagem por fusão, requer uma série de precauções, a fim de evitar a perda de propriedades mecânicas devido ao coalescimento dos grãos, formação de estruturas grosseiras, distorção e alto nível de tensões residuais, entre outros defeitos associados à solidificação (LEE et al., 2005; MAGGIOLINI et al., 2016; REZA-E-RABBY et al., 2018; YANG et al., 2018). Em especial, as ligas de alumínio da série 7XXX apresentam pior soldabilidade, devido principalmente ao fenômeno de superenvelhecimento e crescimento excessivo de precipitados, que fragiliza a junta soldada. Este fenômeno ocorre de forma mais intensa durante aquecimento na soldagem por fusão, que emprega alta temperatura para promover a união dos materiais.

Para superar tais dificuldades impostas pelos processos de soldagem tradicionais, a aplicação de processo de soldagem por fricção, no estado sólido, onde a união de peças ocorre sem fusão, tem sido utilizado de forma mais intensa, como o *Friction Stir Welding* (FSW) (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009; TEXIER et al., 2018). No entanto, o processo FSW possui diversas variáveis que influenciam o desempenho da junta soldada como a velocidade de rotação da ferramenta, geometria da ferramenta, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da ferramenta, força axial e entrada do ombro da ferramenta. Assim, é necessário um estudo prospectivo para obter parâmetros de soldagem adequados (AVAL, 2015; JI et al., 2015; SUTTON et al., 2002).

A Soldagem por fricção linear (FSW) foi inventada pelo TWI (The Welding Institute) no Reino Unido em 1991. Trata-se de uma técnica de soldagem no estado sólido que foi inicialmente utilizada nas ligas de alumínio devido à dificuldade de soldagem destas ligas pelos processos de fusão convencionais. Inúmeros trabalhos têm demonstrado que esta técnica pode ser utilizada em ligas de alumínio, cobre, titânio, magnésio, zinco, aço e plástico. Entre muitas aplicações destacam-se as indústrias marítimas, aeroespaciais, automotivas entre outras (FIORAVANTI, 2008).

O FSW é um processo de soldagem que emprega o calor gerado pelo atrito de uma ferramenta em contato com o local onde deve ser feita a solda. Esta ferramenta é normalmente feita de aço e rotaciona ao mesmo tempo que exerce uma força contra as chapas e avança ao

longo da junção. Além do calor gerado pelo atrito, são induzidas deformações plásticas no local da solda. A temperatura atingida neste processo é suficiente para deixar o material em estado semi-sólido, não ocorrendo a fusão do mesmo (MIYAURA, 2012). Esse processo não utiliza materiais adicionais o que descarta uma preocupação muito importante no processo de união de chapas que é a compatibilidade com outros materiais.

Portanto, estudos prospectivos da utilização do processo FSW e a influência de seus parâmetros de processo nas propriedades mecânicas e magnitude das tensões residuais de fabricação em juntas soldadas de alumínio da série 7XXX são necessários para compreender o mecanismo de geração destas tensões residuais e obtenção de juntas soldadas de alta qualidade.

Para analisar a qualidade das soldas e verificar os impactos que a soldagem FSW influencia no resultado é de suma importância que sejam efetuados ensaios mecânicos a fim de simular a utilização da solda no cotidiano e com os resultados obtidos poder dar um parecer a eficácia do processo. Ensaios mecânicos são muito comuns na engenharia mecânica como ensaios de tração, compressão, dobramento, dureza, entre outros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Executar soldagens pelo processo FSW em liga de alumínio 7075-T651 e avaliar à influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas e microestrutura de juntas de soldadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Prospectar parâmetros de soldagem que viabilizem a produção de juntas soldadas pelo processo FSW;
- Averiguar a influência dos parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas em tração e dureza das juntas soldadas;

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 ALUMINIO E SUAS LIGAS

A disponibilidade do alumínio é relativamente recente na história. O homem já conhecia o ouro, prata, cobre, ferro e vidro por milênios, quando o processo de produção econômica do alumínio foi desenvolvido em 1886. Apesar de estar presente na proporção de 8% na crosta terrestre, a razão dessa aparição tardia é que o metal tem uma grande afinidade pelo oxigênio, ao qual se liga em uma combinação muito forte, dificultando o beneficiamento da bauxita e possibilitando a produção do alumínio. A quantidade de energia necessária para separar o alumínio do oxigênio representava a maior dificuldade para isolar o metal (ABAL, 2017).

Quando o alumínio era pouco conhecido e tinha um custo elevado de produção, suas primeiras aplicações foram limitadas a trabalhos luxuosos, como em estatuetas e placas comemorativas. Com o desenvolvimento dos processos industriais, o metal passou a estar disponível em maiores quantidades (embora ainda medido em quilos ao invés de toneladas), e começou a ser usado na decoração Vitoriana como em bandejas e escovas de cabelo ornamentais. No final do Século XIX, com o aumento da produção e preços menores, foi sendo gradualmente utilizado em utensílios de cozinha e em alguns dos primeiros automóveis que já possuíam painéis revestidos de alumínio comercialmente puro. Conseqüentemente, no início do Século XX, as indústrias de alumínio começaram a trabalhar na produção de ligas de alumínio com propriedades mecânicas mais elevadas. Os primeiros experimentos ocorreram através de tentativas e erros, aliados a observações perspicazes, responsáveis pelo aprimoramento dos princípios metalúrgicos fundamentais envolvidos (ABAL, 2017).

Ocupando a primeira colocação como elemento metálico mais abundante da crosta terrestre, o alumínio é um elemento de grande utilidade para a indústria devido sua flexibilidade no que diz respeito a suas aplicações, pois ele reúne diversas propriedades de acordo com suas ligas, pois cada liga tem um ou mais elementos que caracterizam a mesma, que além disso fortalece ou até adiciona características no alumínio.

O alumínio, devido a sua enorme versatilidade e a suas excelentes propriedades, boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, leve, ótimo aspecto estético, alta condutibilidade térmica e elétrica, reciclável e competitivo em relação a outros metais, é um insumo com aplicações em diversos setores industriais e, desta forma, está presente em vários momentos de nosso dia-a-dia, sendo que, devido a sua grande contribuição para preservação ambiental, a tendência é que os produtos transformados estejam cada vez mais presentes na vida do consumidor (FERREIRA et al, 1999).

A densidade do alumínio é de $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 1/3 da densidade do aço. Entre outras propriedades principais pode-se citar a sua elevada condutividade elétrica e térmica. No entanto, esse metal por si só não pode ser utilizado para a obtenção de respostas a todas as solicitações de engenharia. A combinação de elementos para a obtenção de ligas e a aplicação de determinados tratamentos térmicos aprimoram as propriedades do material,

impulsionando a produção de alumínio específico para diferentes aplicações (GARCIA RUANO, 2017).

Além disso ele se divide em duas categorias de obtenção, o alumínio primário e secundário. O alumínio primário é o metal fundido, obtido a partir da redução do óxido de alumínio, mediante processo eletrolítico sendo que o teor mínimo de pureza mundialmente requerido é de 99,7% de alumínio, o produto semi-manufaturado é o produto intermediário entre o alumínio primário e o produto acabado para uso final. De uma forma mais técnica, a produção de semi-manufaturados abrange a produção de chapas e lâminas, folhas, extrudados, fios e cabos condutores, fundidos e forjados, pó e destrutivos. Já o alumínio secundário é obtido com um ou mais elementos, como silício, titânio e zinco, com teores acima do utilizado na produção do alumínio primário (FERREIRA et al, 1999).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMINIO

Apesar de suas peculiares propriedades físicas e químicas, ainda assim o alumínio não consegue ser amplamente aplicado, pois há diversas aplicações para as quais o alumínio não consegue atender a todos os requisitos necessários, mas se encaixa muito bem em alguns deles. Foi nesse contexto que surgiram as ligas de alumínio, que permitem que através da adição de elementos de liga seja possível continuar usufruindo em parte das propriedades interessantes deste metal, ao mesmo tempo em que outras de suas características são aprimoradas. A principal modificação feita nas ligas de alumínio é o endurecimento por precipitação, que melhora a resistência mecânica do material através da adição de elementos de liga específicos e tratamentos térmico (FERNANDES; MARTENDAL, 2016).

As ligas de alumínio são classificadas, de acordo com a *Aluminum Association*, como ligas de fundição e ligas trabalhadas mecanicamente. Dentro do grupo das ligas trabalhadas mecanicamente, há duas classificações: as tratáveis termicamente e ligas não tratáveis termicamente. As ligas tratáveis termicamente são aquelas que têm sua dureza aumentada através do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento; pertencem a esse grupo as ligas das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e a maioria da série 8xxx. As ligas não tratáveis termicamente são endurecidas por encruamento, consequente do trabalho a frio. Pertencem a esse grupo as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx (VASUDEVAN; DOHERTY, 1993). A Tabela 1 contém as séries e seus principais elementos de liga.

Tabela 1 - Ligas de alumínio pela classificação da ABNT NBR 6834.

Série	Principais elementos de liga	Aplicação
1XXX	Alumínio (Al) $\geq 99\%$ puro	Indústrias químicas e elétricas
2XXX	Cobre (Cu)	Aeronaves
3XXX	Manganês (Mn)	Aplicações arquitetônicas e produtos de uso geral
4XXX	Silício (Si)	Chapas para brasagem e eletrodos de soldagem
5XXX	Magnésio (Mg)	Casco de barcos
6XXX	Magnésio e Silício (Mg, Si)	Produtos extrudados de uso arquitetônico
7XXX	Zinco (Zn)	Componentes estruturais de aeronaves
8XXX	Vários (Sn, Li, Fe, Cu, Mg...)	Produtos de uso geral

Fonte: Adaptado de NBR 6834

Ligas de alumínio são materiais nos quais são acrescentados elementos específicos ao alumínio, com a finalidade de desenvolver ou melhorar propriedades específicas (ROSA, 2009). São citados abaixo alguns dos principais elementos de ligas, os quais apresentam de forma geral as seguintes características (ZANGRANDI, 2008):

- Zinco: contribui acentuadamente com o envelhecimento por precipitação natural e artificial, mas não contribui no endurecimento por deformação, quando presente em solução sólida;
- Cobre: aumenta a resistência mecânica e proporciona endurecimento por precipitação natural, porém, diminui a resistência a corrosão, a ductilidade e a solubilidade da liga;
- Magnésio: reduz a temperatura de fusão, aumenta a capacidade de endurecimento por deformação e a resistência a corrosão em água salgada;
- Silício: diminui a temperatura de fusão e aumenta a fluidez da liga, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade. Se adicionado junto com o magnésio proporciona o endurecimento por precipitação da liga;
- Manganês: aumenta a resistência mecânica do alumínio comercialmente puro (99,50% a 99,79% de pureza) com redução pequena da ductilidade e melhora a resistência à corrosão.

Esses elementos de liga podem ser associados de forma a obter ligas específicas, que podem ser binárias, ternárias e quaternárias, de acordo com os elementos mais abundantes em cada liga.

Série 1XXX: Possui excelente resistência a corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem de maneira moderada a processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza. Aplicações: Indústria química, refletores, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores (GUEDES, 2014).

Série 2XXX: Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e resistência a corrosão inferior as outras ligas de alumínio. As características relacionadas a corrosão podem ser

melhoradas através do recobrimento com alumínio de alta pureza ou ligas da série 6xxx (Cladamento). Aplicações: rodas forjadas para indústrias aeronáuticas e de caminhões, fuselagem e componentes estruturais de aeronaves, componentes de suspensão de automóveis (ALMEIDA, 2015).

Série 3XXX: O manganês proporciona à liga uma boa resistência a corrosão e boa soldabilidade, além de aumentar sua resistência mecânica e dureza, mas reduz sua ductilidade. Aplicações: Utensílios domésticos, tanques de armazenamentos, placas de trânsito, latas de bebidas (ALMEIDA, 2015).

Série 4XXX: O silício pode ser adicionado para abaixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva, por este motivo estas ligas são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brasagem (ALMEIDA, 2015).

Série 5XXX: Possui boa soldabilidade, ductilidade e usinabilidade, além de elevada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina). Aplicação: Alto uso na indústria naval, tanques para criogenia, estruturas automotivas (ALMEIDA, 2015).

Série 6XXX: O magnésio e o silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio (Mg_2Si), formando ligas tratáveis termicamente. As ligas desta série apresentam boa ductilidade, elevada resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e são de fácil usinagem. Aplicações: em uso arquitetônico, quadros de bicicletas e estruturas soldadas (GUEDES, 2014).

Série 7XXX: Tem o zinco, em teores de 1 a 8%, como principal elemento de liga. Quando combinado com o magnésio, apresentam alta resistência mecânica, esta liga é utilizada quando a relação entre resistência mecânica/peso for característica importante. Aplicações: principalmente na indústria aeronáutica, componentes de alta resistência (GUEDES, 2014).

Série 8XXX: Possuem resistência mecânica média. Aplicação: embalagens descartáveis, tampas para indústria alimentícias e bebidas (ALMEIDA, 2015).

3.3 LIGAS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 7XXX

Nos primórdios do desenvolvimento das ligas de alumínio, o sistema binário Al-Zn foi tido como promissor. Realmente a solubilidade do Zn no Al é grande em alta temperatura e decresce para em torno de 2% à temperatura ambiente e devido a isto, este sistema foi aceito como apresentando boa capacidade de endurecimento por precipitação. Entretanto, a extensão do endurecimento foi relativamente baixa porque os precipitados formados foram essencialmente Zn puro, resultando em um limitado endurecimento da liga (POLMEAR, 1958).

Todo equipamento aeronáutico utiliza alumínio, em maior ou menor escala, em diferentes ligas e aplicações. As mais comuns e que são cruciais para o desenvolvimento seguro da aeronave são aqueles presentes nas asas e no teto, como a liga da série 7XXX. Essa especificação se destaca por oferecer as mais elevadas resistências mecânicas entre as ligas de alumínio de modo geral (BRASIL ALUMINIO, 2016).

A combinação do alumínio com diversos elementos resultou numa gama ilimitada de ligas, sendo que para as ligas trabalháveis mecanicamente, a separação foi determinada segundo as normas da ASTM - American Society for Testing and Materials, de modo que as ligas com elementos químicos atuantes fossem agrupadas criando-se grupos e séries de ligas com características físico-químicas semelhantes. Tal classificação leva em conta efeitos como modificações microestruturais e composição química, sendo subdividida em trabalháveis, ou seja, deformáveis a quente e a frio; e ligas de fundição, as quais em razão da grande adição de elementos de liga apresentam baixa capacidade de deformação (OTOMAR, 2010).

Tabela 2: Teores mínimos de elementos de liga que uma liga da série 7XXX deve apresentar.

Al	Zn	Mg	Cu	Cr
Balanco	5,6	25	1,6	0,23

As ligas 7075, empregadas neste trabalho, foram introduzidas em 1943 e contém 5,6% Zn, 2,5% Mg, 1,6% Cu e 0,30% Cr. As ligas de alumínio-zinco possuem baixa densidade (entre 2,7 e 2,94 g/cm³), característica proveniente do alumínio, associada à dureza atribuída pela adição de zinco e são forjadas entre 400 e 530°C (CAMMETT et al, 2000).

O alumínio 7075 é um material metálico vastamente utilizado atualmente, visto que possui características versáteis que auxiliam em diferentes aplicações, proporcionando qualidade e eficiência em seu uso, além de promover todos os benefícios que o metal pode garantir (SOUZA, 2019).

3.4 SOLDAGEM

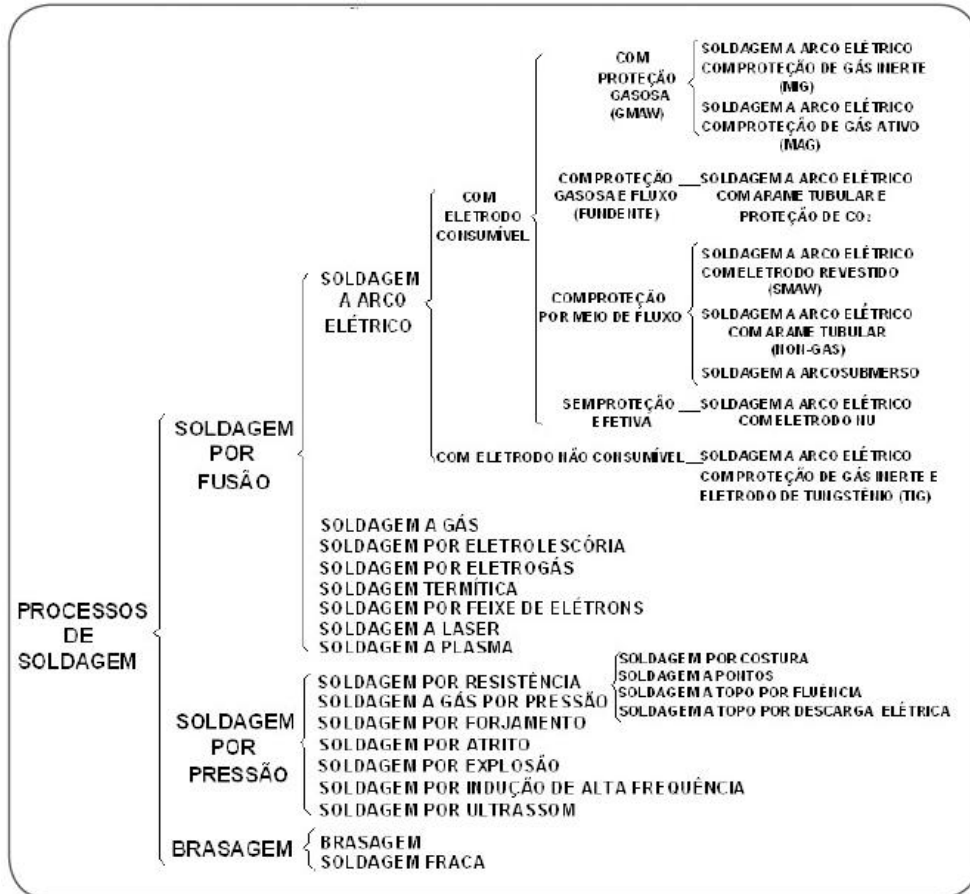
A história da soldagem mostra que desde as mais remotas épocas, muitos artefatos já eram confeccionados utilizando recursos de brasagem, tendo sido descobertos alguns com mais de 4000 anos; a soldagem por forjamento também tem sido utilizada há mais de 3000 anos. A técnica da moderna soldagem começou a ser moldada a partir da descoberta do arco elétrico, bem como também a sintetização do gás Acetileno no século passado, o que permitiu que se iniciassem alguns processos de fabricação de peças, utilizando estes novos recursos. Com o advento da Primeira Guerra Mundial, essa técnica começou a ser mais utilizada nos processos de fabricação; a Segunda Guerra Mundial imprimiu grande impulso na tecnologia de soldagem, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os já existentes (NERIS, 2012).

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Este método de união, considerado em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso. A soldagem é utilizada na fabricação de estruturas simples, como elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias químicas, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanato, joias e de outros objetos de arte (MARQUES et al, 2009).

Estima-se que hoje em dia estão sendo utilizados mais de 70 processos de soldagem mundialmente, sendo este um número dinâmico, pois vários outros processos estão em

desenvolvimento em nível de pesquisa e projetando para breves novas alterações no mercado de soldagem. Isto implica em grandes controvérsias na classificação dos processos, não havendo uma classificação universalmente aceita para os mesmos. Na Tabela 2 anteriormente mostrada utiliza apenas o critério de divisão em famílias, envolvendo o fenômeno físico e utilizando para as subdivisões a forma de energia empregada no processo (NERIS, 2012). A Figura 1 mostra a classificação dos processos de soldagem.

Figura 1: classificação dos processos de soldagem.



Fonte:(NERIS, 2012).

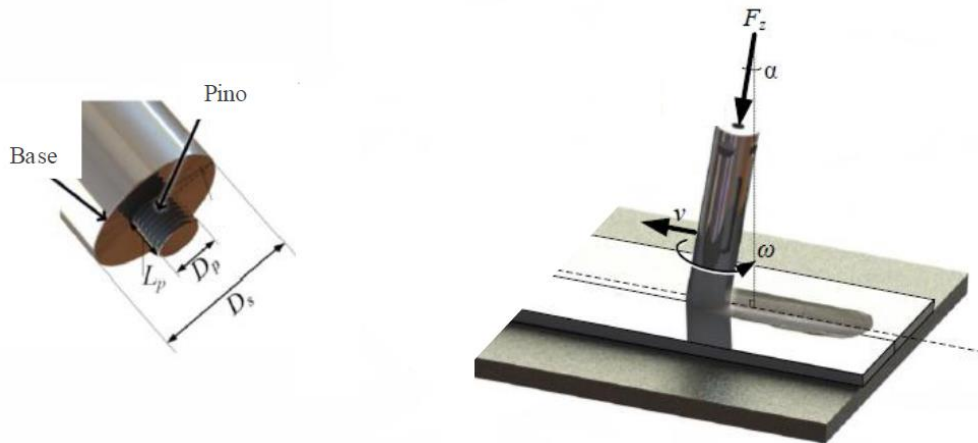
3.4.1 Friction stir welding

O processo Friction Stir Welding (FSW) foi desenvolvido e patenteado no Instituto de Soldagem do Reino Unido (TWI) em 1991 como uma técnica de junta no estado sólido, e foi aplicada inicialmente às ligas de alumínio (THOMAS et al, 1991). O processo de FSW consiste basicamente de quatro fases: a fase de imersão da ferramenta em rotação, na qual a solda é iniciada, a fase do tempo de permanência para aquecimento (*dwell time*) no local de imersão com a finalidade de que a ferramenta e as peças de trabalho atinjam temperaturas suficientes para concretizar a soldagem, a fase de soldagem, em que a solda é consolidada, e a fase final onde a ferramenta é afastada das peças de trabalho. Conforme a ferramenta é

inserida dentro da junta, o calor gerado é conduzido pelo material e pela barra ou chapa de apoio (*backing bar* ou *backing plate*) (KOZMINSKI, 2015).

Neste processo, a solda é produzida recorrendo a uma ferramenta rotativa não consumível, constituída por uma base e um pino, como se ilustra na Figura 2. Durante o processo, a base é a principal responsável pela geração de calor, o que leva ao amaciamento do MB. Ao mesmo tempo, o pino promove o fluxo de material por deformação plástica em torno da ferramenta, levando assim à consolidação da junta soldada. Na figura 2 mostra-se um esquema onde se encontram representados os principais parâmetros do processo, i.e., velocidades de rotação (ω) e avanço (v) da ferramenta, ângulo de ataque (α) e penetração da ferramenta (dz) ou força axial (F_z), caso o processo esteja a ser controlado por posição ou força, respetivamente. Para além disso, define-se como lado de avanço, o lado da soldadura em que os vetores correspondentes à velocidade de avanço e de rotação têm o mesmo sentido e como lado de recuo, o lado oposto, onde os sentidos dos vetores das velocidades de avanço e rotação são opostos (SILVA, 2019).

Figura 2: Ferramenta do Processo FSW e parâmetros do processo respectivamente.



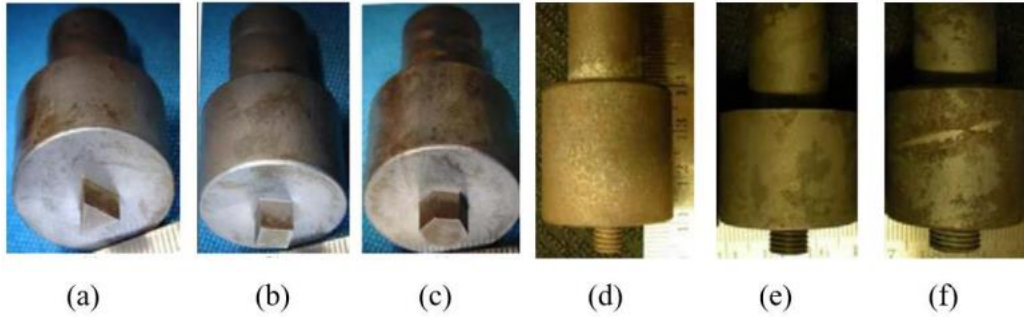
Fonte:(SILVA, 2019).

A ferramenta no processo de FSW tem duas funções principais: elevar localmente a temperatura na peça e agitar o material das peças a soldar para permitir a união das mesmas (MISHRA, 2005). Portanto, a ferramenta influi no aporte de calor no processo, no fluxo do material, na potência requerida para a realização da solda e na uniformidade da solda. A ferramenta geralmente é composta por um ombro e um pino, o ombro é o principal responsável pela geração de calor e por evitar a expulsão do material e a formação de rebarbas. O pino tem como função principal agitar e deformar o material próximo à ferramenta e, em segunda instância gerar calor (COLEGROVE et al, 2006).

Tanto a geometria do ombro quanto do pino afeta o fluxo do material. Existem diferentes desenhos de ferramentas com variações cilíndricas, cônicas e com canais para o ombro e o pino, os quais são projetados para melhorar a qualidade das soldas. O fluxo plástico dos materiais durante a soldagem é complexo e depende do projeto da ferramenta, em que a maior parte da deformação plástica ocorre pelo cisalhamento do material no seu entorno. A fim de melhorar o fluxo de material no processo é possível o desenvolvimento de diversos tipos de pinos, roscados, cônicos, triangulares, quadrados, etc. Conforme estudado por

Colaço, (2019), Mehta e Badheka, (2016). Algumas configurações de pino são observadas na Figura 3.

Figura 3: Diferentes geométricas de pino para ferramenta FSW, triangular (a), quadrado (b), hexagonal (c), cilíndrica roscada de 6 mm (d), 8 mm (e), e 10 mm (f).



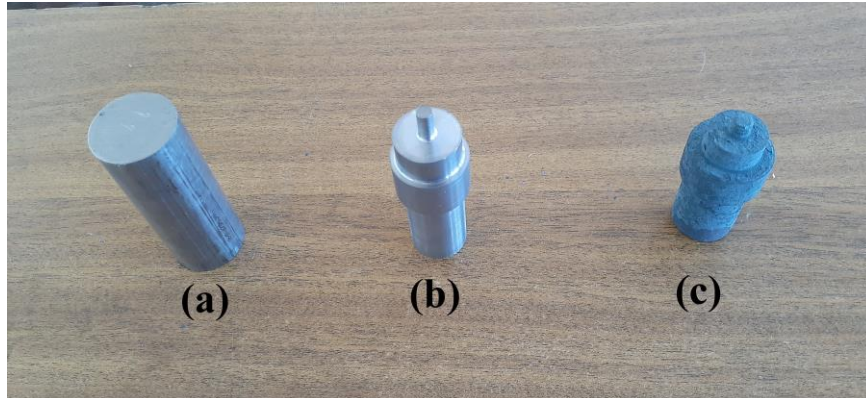
Fonte: (MEHTA; BADHEKA, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 CONFEÇÃO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM

Para realizar a soldagem das juntas soldadas foi empregada uma ferramenta cilíndrica, com pino rosqueado e de ponta arredondada, confeccionada em aço H13 na condição temperada e revenida. Na Figura 4 é possível observar a ferramenta confeccionada.

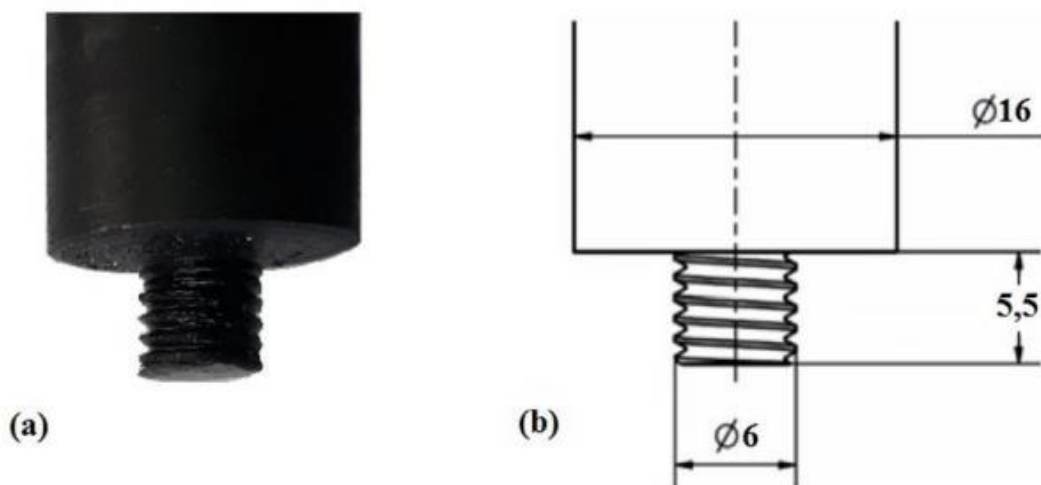
Figura 4: (a) Aço H13, (b) Ferramenta confeccionada, (c) ferramenta após a tempera.



Fonte: próprio autor.

A ferramenta e suas dimensões são observadas na Figura 5. O material utilizado para a confecção da ferramenta foi um tarugo de aço ferramenta H13, para trabalho a quente, que após usinagem foi submetida a um aquecimento a 1050 °C por 25 minutos e resfriado ao ar, a fim de obter a dureza e a resistência ao desgaste necessárias para a utilização no processo de soldagem (COUTINHO, 1992).

Figura 5: Ferramenta FSW: (a) confeccionada e (b) dimensões de projeto (em 'mm').



Fonte: autoria própria.

4.2 CONFEÇÃO DAS JUNTAS

As juntas foram confeccionadas em uma fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat, conforme Figura 6.

Figura 6: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat.



Fonte: próprio autor.

A fixação das chapas é um fator muito importante pois, a má fixação pode ocasionar um deslocamento na hora de soldar causando assim falhas nas juntas. Neste sentido, as juntas soldadas foram fixadas à mesa da fresadora com garras de aperto vertical e inseridas em um suporte conforme a Figura 7.

Figura 7: fixação das chapas na fresadora.



Fonte: próprio autor.

Os parâmetros de soldagem empregados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem

Junta Soldada	PARAMETROS DE FABRICAÇÃO		
	n [rpm]	f [mm/min]	a [°]
1	410	48	1
2	1415	48	1
3	410	118	1
4	1415	118	1
5	410	48	3
6	1415	48	3
7	410	118	3
8	1415	118	3
9, 10, 11 (Pontos Centrais)	912	83	2

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1 Ensaio mecânico de tração uniaxial

Para determinar a resistência à tração das juntas foi utilizada uma prensa universal de ensaio, modelo MTS-810, adaptada para a tração e localizada no Laboratório de ensaios da unidade acadêmica de engenharia mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), podendo ser observado na Figura 8. Para os ensaios foi adotado uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ruptura dos corpos de prova, sendo utilizado um corpo de prova para cada parâmetro.

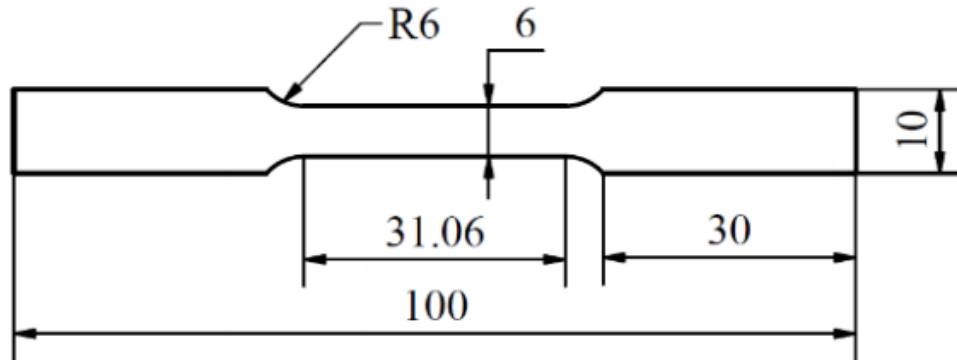
Figura 8: Fixação de corpo de prova para ensaio de tração uniaxial em garras da máquina universal de ensaios MTS, modelo 810.



Fonte: autoria própria.

As dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração são observadas na Figura 9, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

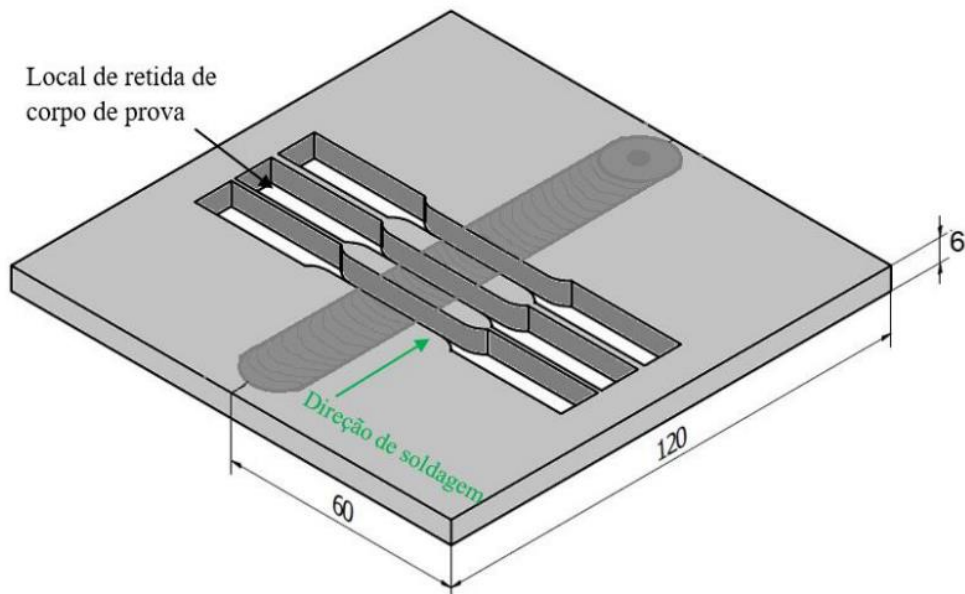
Figura 9: Dimensões especificadas para amostra de ensaio de tração (em ‘mm’).



Fonte: autoria própria.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram cortados por eletroerosão à fio. O local de retirada do corpo de prova e indicação da posição da região da solda nas chapas soldadas é ilustrada na Figura 10.

Figura 10: Representação da posição retirada de corpos de prova e da região da solda nas juntas soldadas por FSW (dimensões em ‘mm’).



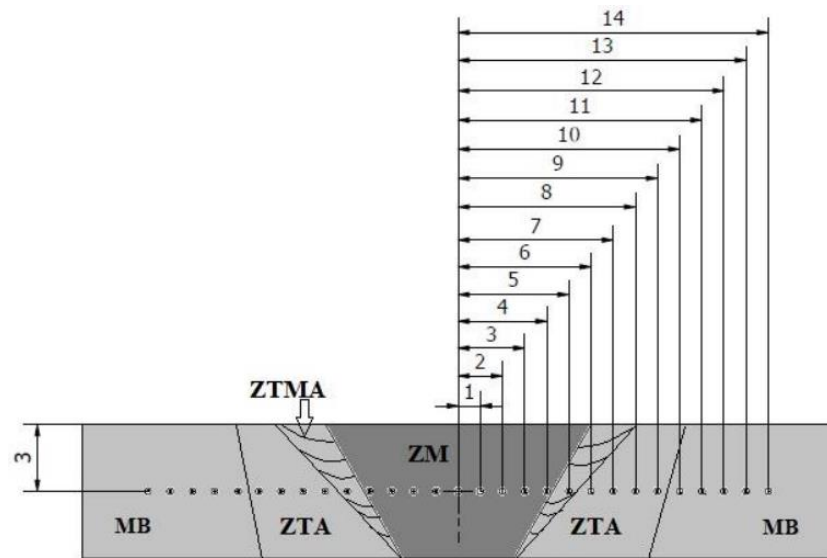
Fonte: autoria própria.

4.3.2 Ensaio mecânico de microdureza vickers

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers utilizando um microdurômetro digital FM-700 da FutureTech ao longo de toda junta aplicando-se uma carga de 200 gramasforça (gf), por 15 segundos, com espaçamento entre as impressões de 1 mm, passando desde o

metal de base até as zonas afetadas pela soldagem, ao longo de uma linha horizontal transversal ao cordão de solda na posição de centro de cada junta, em uma distância de 14 mm a partir da linha de centro da solda no sentido do lado de avanço e recuo da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Representação de distribuição das indentações de microdureza (dimensões em 'mm').



Fonte: autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCURSÕES

A priori, foram realizadas inspeções visuais em todas as onze juntas soldadas com os diferentes parâmetros de soldagem com o intuito de observar defeitos superficiais na solda, que incluem: falta de penetração, túneis, furo remanescente e excesso de rebarba (flash), já que esses defeitos estão ligados diretamente aos resultados dos ensaios mecânicos posteriores. Como ilustração geral, na Figura 12 pode ser observado uma vista superficial da junta soldada 2 fabricada pelo processo FSW. Por inspeção visual superficial, é verificada boa qualidade e aparência visual a junta soldada por FSW, sem ocorrência de deformações (empenamento) nas dimensões da chapa soldada e ausência de defeitos superficiais, apresentando acabamento superior, quando comparado a juntas soldadas por processos de soldagem convencionais à arco, isto é, com ausência de respingos, inclusão de escória aparente, aparecimento de porosidade e concavidades.

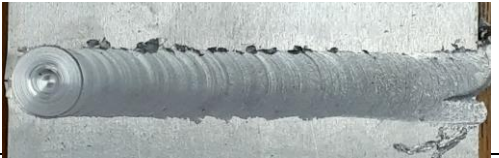
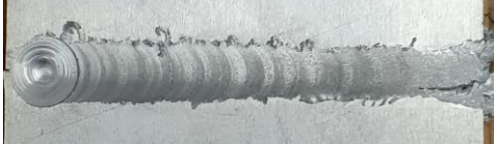
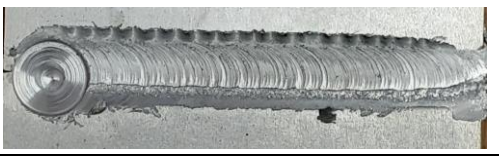




Figura 12: Vista superficial da Junta soldada 1



Fonte: próprio autor.

A Tabela 4 ilustra a superfície dos cordões de solda das juntas soldadas 1-8, e 11 (correspondente aos pontos centrais) fabricadas com diferentes combinações de parâmetros de soldagem, com observações e defeitos identificados. Nas juntas soldadas com ângulo de inclinação da ferramenta de 1° foram identificados túneis e irregularidades na superfície soldada. Ao se utilizar o ângulo de inclinação da ferramenta de 3° e 2° (Ponto Centrais), com os mesmos parâmetros de soldagem, não foi identificado defeitos nas soldas, indicando melhor adequação do ângulo com relação à qualidade das juntas soldadas.

Tabela 4 - Cordões de solda das diferentes juntas soldadas.

Junta soldada	Parâmetros de confecção	Análise	Vista superior do cordão de solda
1	n: 410 RPM; f: 48 mm/min; a: 1°	Sem defeitos superficiais aparentes	
2	n: 1415 RPM; f: 48 mm/min; a: 1°	Sem defeitos superficiais aparentes.	
3	n: 410 RPM; f: 118 mm/min; a: 1°	Pouca penetração do ombro, cordão de solda com aparência rasa.	
4	n: 1415 RPM; f: 118 mm/min; a: 1°	Trinca superficial devido falta de mistura durante o processo.	
5	n: 410 RPM; f: 48 mm/min; a: 3°	Sem defeitos superficiais aparentes.	
6	n: 1415 RPM; f: 48 mm/min; a: 3°	Geração grosseira de rebarba.	
7	n: 410 RPM; f: 118 mm/min; a: 3°	Cordão de solda irregular com excesso de rebarba fina	
8	n: 1415 RPM; f: 118 mm/min; a: 3°	Geração de rebarba grosseira; trinca no local de saída da ferramenta.	
9, 10 e 11 (Pontos Centrais)	n: 912 RPM; f: 83 mm/min; a: 2°	Excesso de rebarba fina	

Fonte: próprio autor.

As juntas soldadas 1 e 5, não apresentam nenhum tipo de defeito superficial aparente. Indicando uma boa adequação da combinação dos parâmetros de velocidade de soldagem e rotação da ferramenta utilizados na fabricação nestas juntas. As juntas soldadas 2 e 8 apresentam pequenas trincas no local de saída da ferramenta e furo remanescente, conforme já observado por COLAÇO (2019). Os cordões de solda das juntas soldadas 3 e 7 possuem aparência irregular, provavelmente devido a combinação dos parâmetros de soldagem que propiciam maior trabalho à frio (maior velocidade de soldagem e menor velocidade de rotação da ferramenta). Ainda na junta soldada 3, é observado uma característica de cordão de solda raso, indicando pouca entrada do ombro da ferramenta, e não adequação do ângulo da ferramenta.

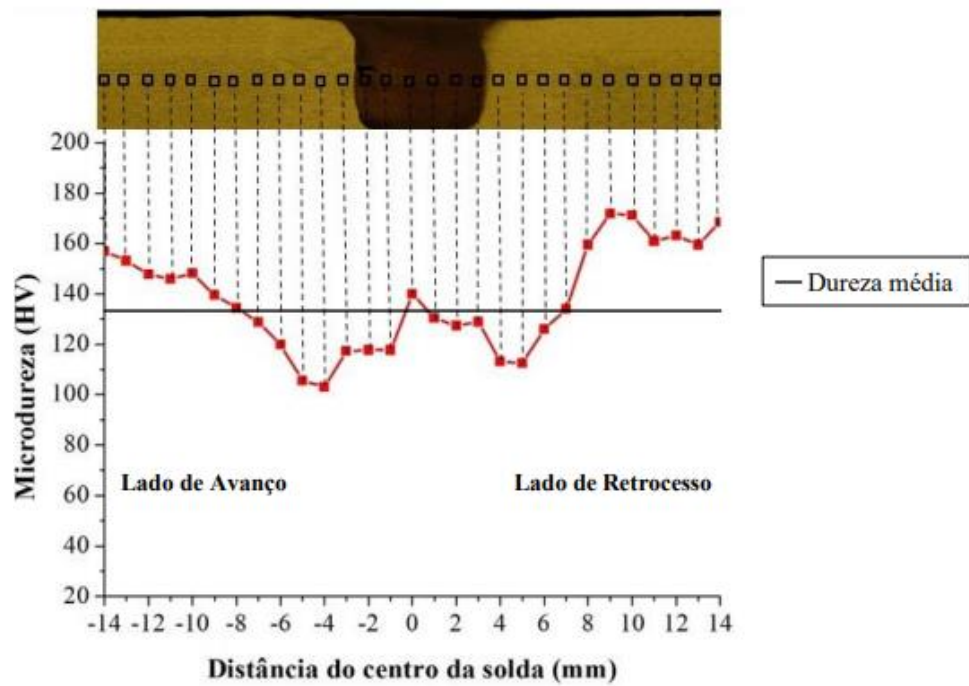
As juntas soldadas 4, 6 e 8 apresentam geração grosseira de rebarba, devido ao maior valor de velocidade de rotação da ferramenta utilizado na fabricação destas juntas (PODRŽAJ; JERMAN; KLOBČAR, 2015). O defeito *groove* também é observado na junta soldada 4, caracterizado por uma fissura ao longo da superfície do cordão de solda, podendo ser causado por uma mistura anormal, decorrente de baixo ângulo de inclinação da ferramenta de soldagem (CHEN et al., 2006). As juntas soldadas 9, 10 e 11, equivalentes ao ponto central, apresentaram excesso de rebarba fina, frequentemente presente em juntas FSW (KIM et al., 2006).

O lado de avanço (LA) está na parte inferior dos cordões de solda no Quadro 11, enquanto o lado de retrocesso (LR) fica na parte superior. A concentração de rebarba produzida durante o processo de soldagem FSW é verificado ao LA na superfície das juntas soldadas. Já que o fluxo de material no LA e no LR são diferentes (ZHANG; ZHANG, 2007), o que sugere que a presença de rebarba ao LA é devido ao maior transporte de material do LR para o LA pela ferramenta durante o processo de soldagem, o que pode indicar a presença de defeitos internos nas juntas soldadas atrelados à falta de material, no local correspondente ao LR. CAVALIERE et al. (2009), ao soldar diferentes séries de ligas de alumínio termicamente tratáveis, comprovaram que o material acumulado (na forma de rebarba) no LA da ferramenta influencia fortemente a mistura do material durante o processo FSW.

5.1. Perfis de Microdureza

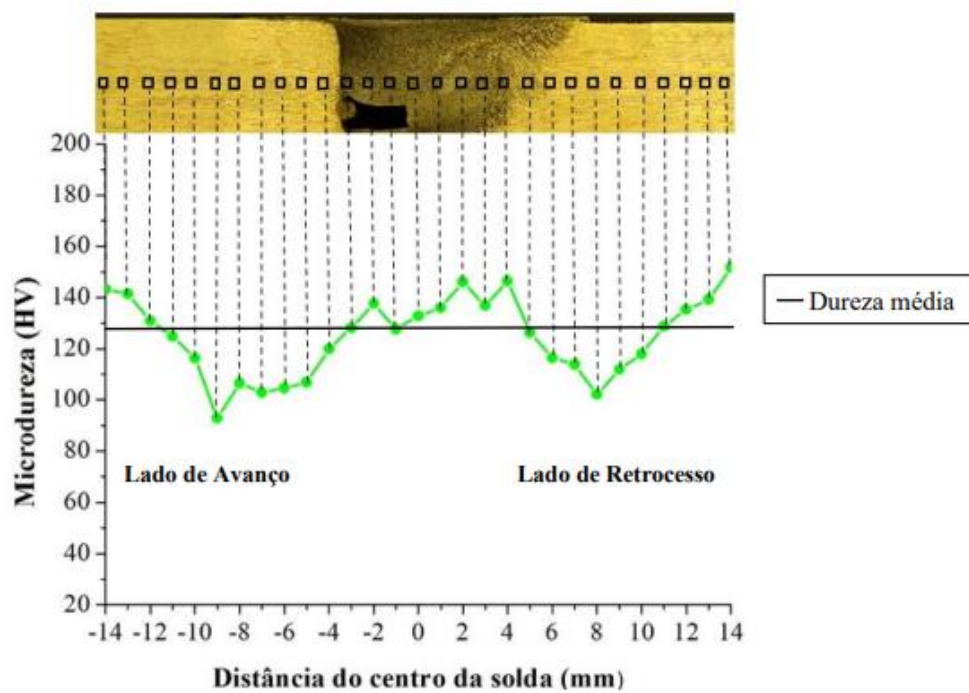
Os perfis transversais de microdureza Vickers obtidos das juntas soldadas 1-8 por FSW estão dispostos nas Figuras 13 a 20, sequencialmente. Os perfis de microdureza das juntas soldadas 9-11 são agrupados na Figura 21, visto que correspondem a juntas com parâmetros de fabricação iguais, de ponto central com objetivo principal o favorecimento da análise estatística.

Figura 13: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 1.



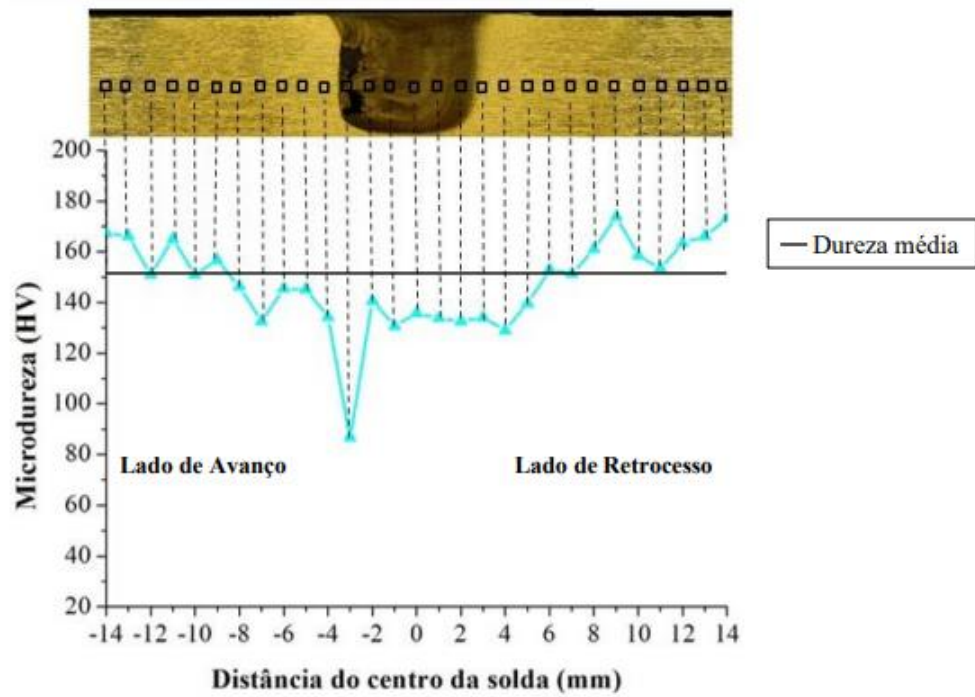
Fonte: Próprio Autor

Figura 14: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 2.



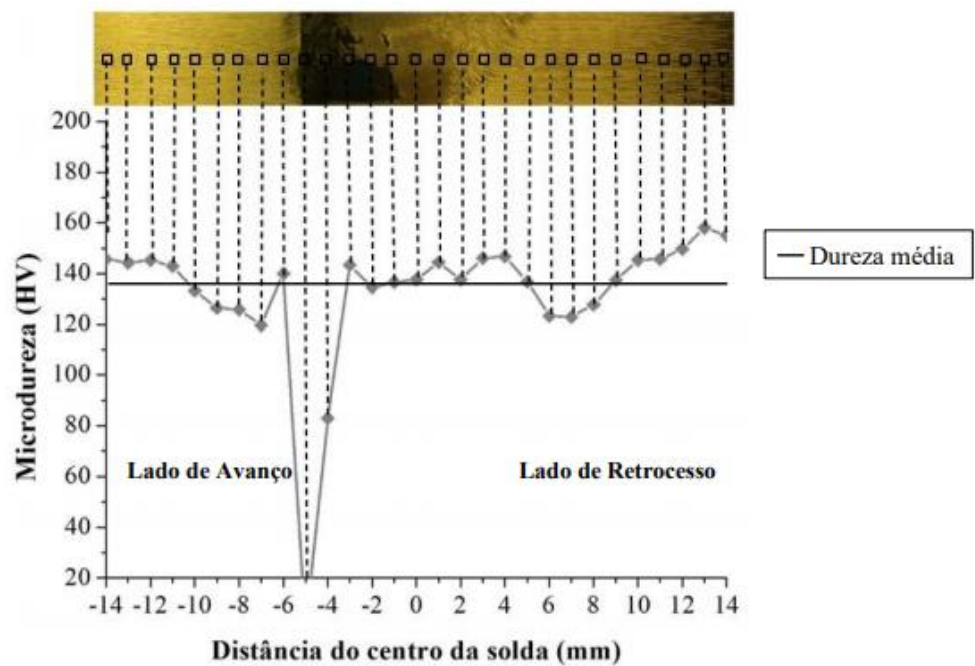
Fonte: Próprio Autor

Figura 15: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 3.



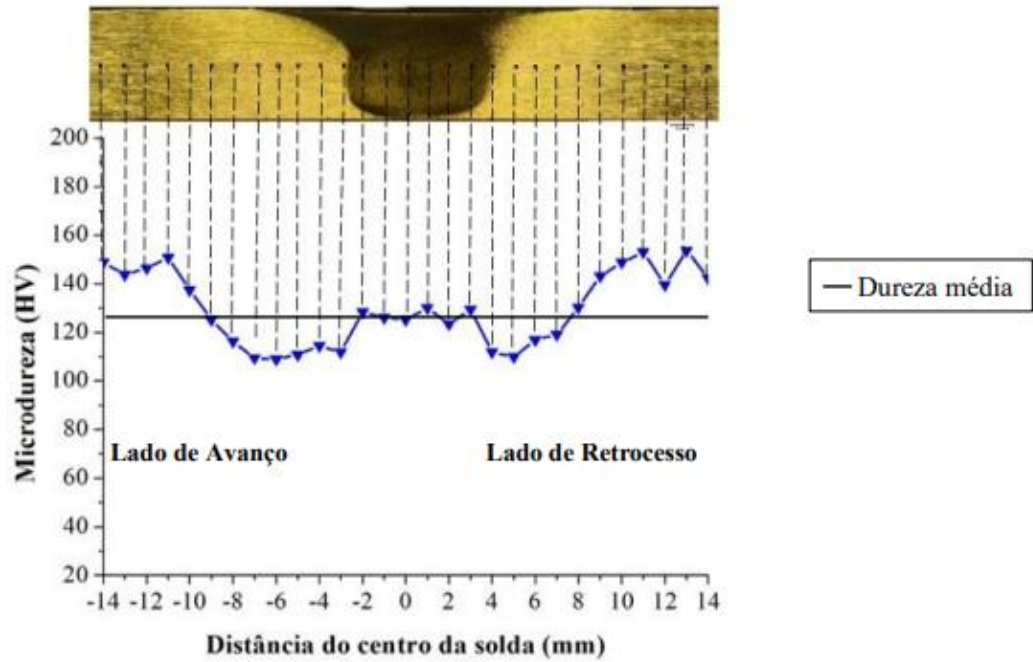
Fonte: Próprio Autor

Figura 16: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 4.



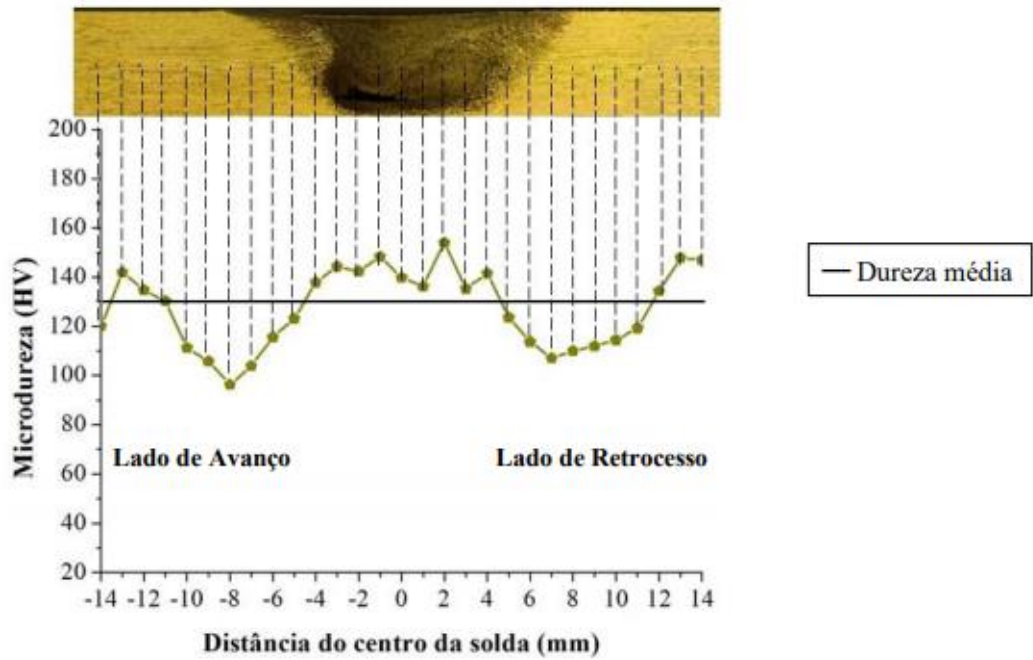
Fonte: Próprio Autor

Figura 17: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 5.



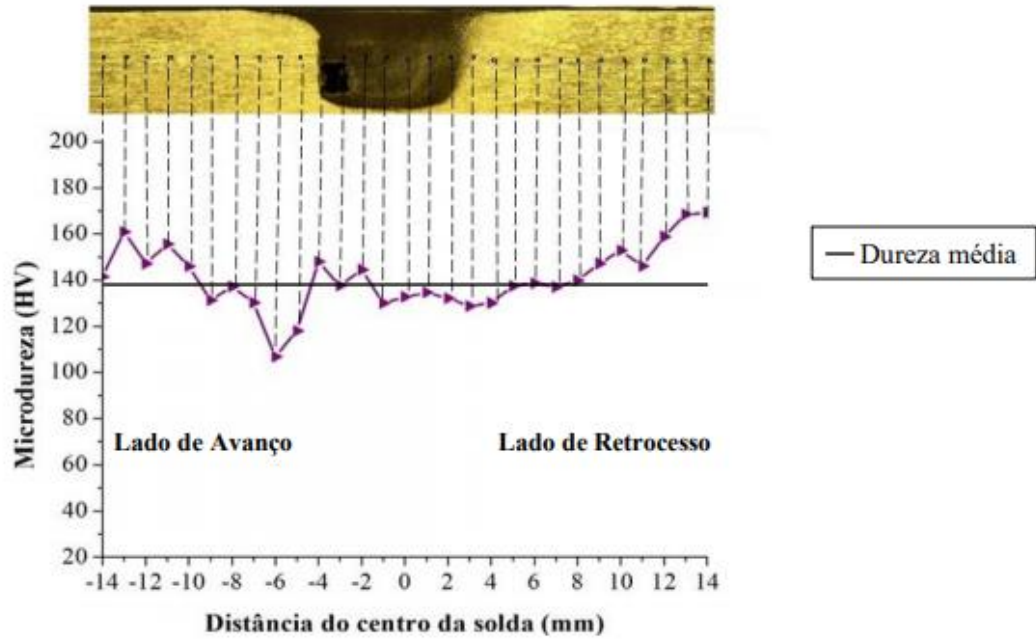
Fonte: Próprio Autor

Figura 18: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 6.



Fonte: Próprio Autor

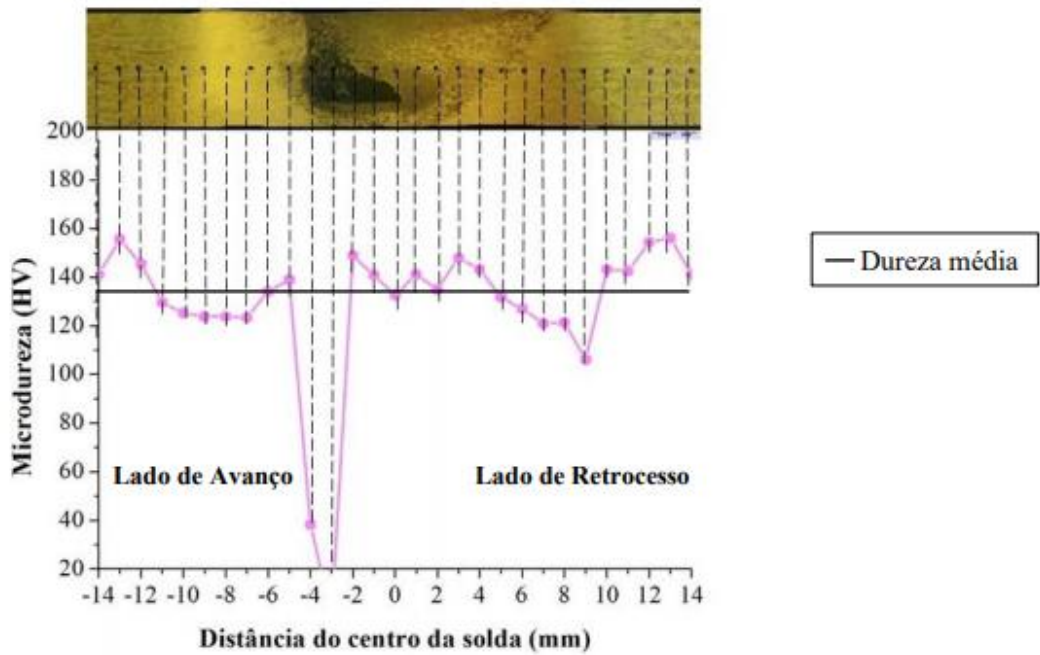
Figura 19: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 7.



1

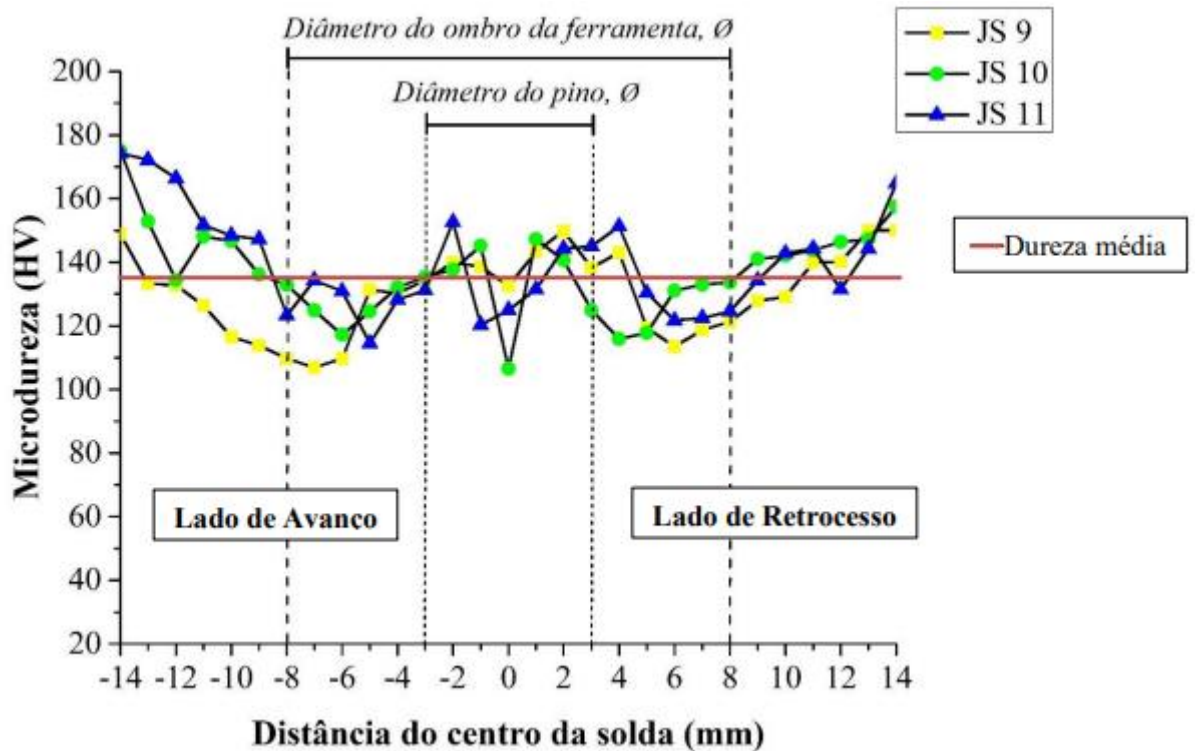
Fonte: Próprio Autor

Figura 20: Perfil transversal de microdureza vickers da junta soldada 8.



Fonte: Próprio Autor

Figura 21: Perfis transversais de microdureza vickers das juntas soldadas 9, 10 e 11, correspondentes a combinação de parâmetros de ponto central.



Fonte: Próprio Autor

Analisando os perfis de microdureza das juntas soldadas 1, 2, 5 e 6 é possível observar um pequeno aumento da dureza na região da ZM das juntas soldadas em relação a ZTMA e a ZTA com diminuição dos valores próximo as posições -8 mm e 8 mm, correspondente a região de contato com as extremidades do ombro da ferramenta de soldagem.

A junta 5 destaca-se devido aos seus valores estarem dentro da faixa de dureza média no cordão de solda o que vale destacar também que a mesma tem baixa rotação e baixo avanço, logo ela é uma grande candidata a ser uma solda de excelente qualidade.

Os valores de dureza voltam a aumentar e estabilizar no sentido do MB, formando um perfil de dureza semelhante a letra 'W', em conformidade com a literatura (DA SILVA et al., 2011). O aumento da dureza no centro da solda é atribuído ao refino de grão que ocorre na ZM da junta soldada por FSW. A ocorrência de encruamento provoca o aumento da dureza, devido ao intenso trabalho mecânico que o material sofre durante o processo da soldagem por atrito. A queda de dureza nas regiões adjacentes, ZTMA e ZTA, é devido, provavelmente, ao aquecimento e trabalho mecânico que o ombro da ferramenta exerce sobre o material soldado, provocando o crescimento e alongamento de grãos, com menor dureza em relação a ZM e MB, conforme a relação de Hall-Petch, que prevê maior resistência mecânica em grãos de menor dimensão

(CALLISTER; RETHWISCH, 2011). Resultados similares foram obtidos por (SIVARAJ, et al 2014), (RAJAKUMAR, et al 2011) e (MOHAMMADI-POUR, et al 2017) para esta mesma liga soldada pelo processo FSW.

As juntas soldadas 3, 4, 7 e 8 não revelam o mesmo perfil de dureza observado nas juntas 1 e 2, devido possivelmente aos defeitos de soldagem localizados próximos as regiões de verificação de dureza, que reduzem consideravelmente os valores de dureza nas regiões indentadas pela presença de descontinuidades e espaços vazios. Nas junta soldadas 3 e 7, ainda é possível verificar maior queda de dureza no LR, região correspondente a ZTA e ZTMA.

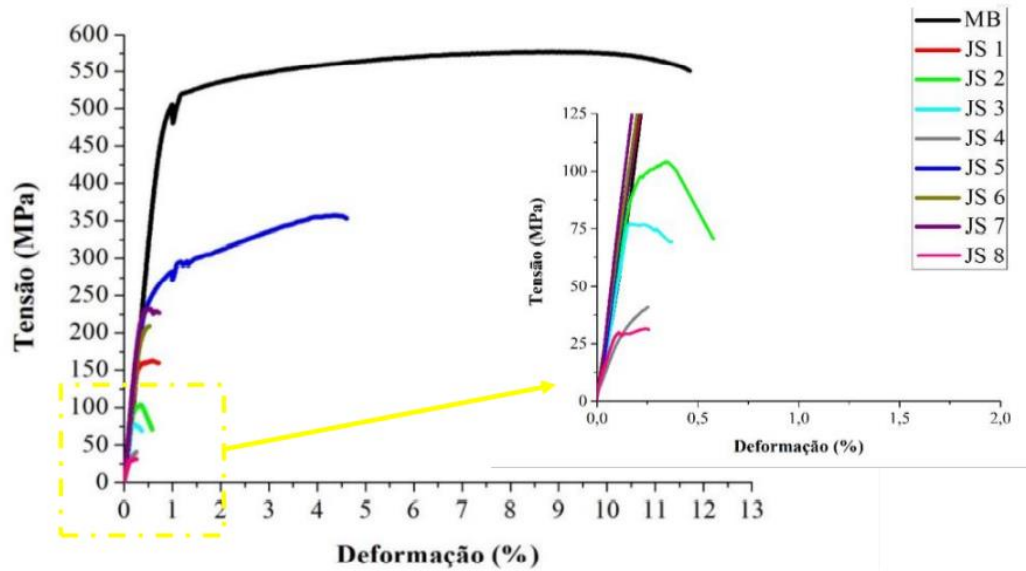
Na distribuição de dureza das juntas soldadas 4 e 8, nota-se queda brusca de valores de dureza entre as posições -2 mm e -5 mm localizadas no LR da ferramenta, devido presença de uma descontinuidade entre as ZTMA e ZM, ocasionados por mistura inadequada, ocorrida possivelmente pela combinação de parâmetros de maior velocidade de soldagem e rotação da ferramenta, gerando maiores esforços para o movimento da ferramenta, diminuindo, desta forma, a homogeneidade da plastificação e mistura.

Os perfis de microdureza das juntas soldadas 9, 10 e 11, de parâmetros de ponto central, Figura 46, demonstram queda dos valores de dureza na região próxima as bordas do ombro da ferramenta. Indicando que o atrito excessivo do ombro sobre o material proporcionou calor o suficiente para a deterioração da dureza nessa região, devido possivelmente ao crescimento dos grãos e dissolução de precipitados. Já na área correspondente ao diâmetro do pino, aproximadamente equivalente a ZM, é verificada diminuição de dureza ao centro da união, junto ao núcleo da solda, indicando uma mistura não homogênea, e redução do efeito de encruamento de grão, se comparado a juntas soldadas 1, 2, 5 e 6.

5.2. Resistência a Tração

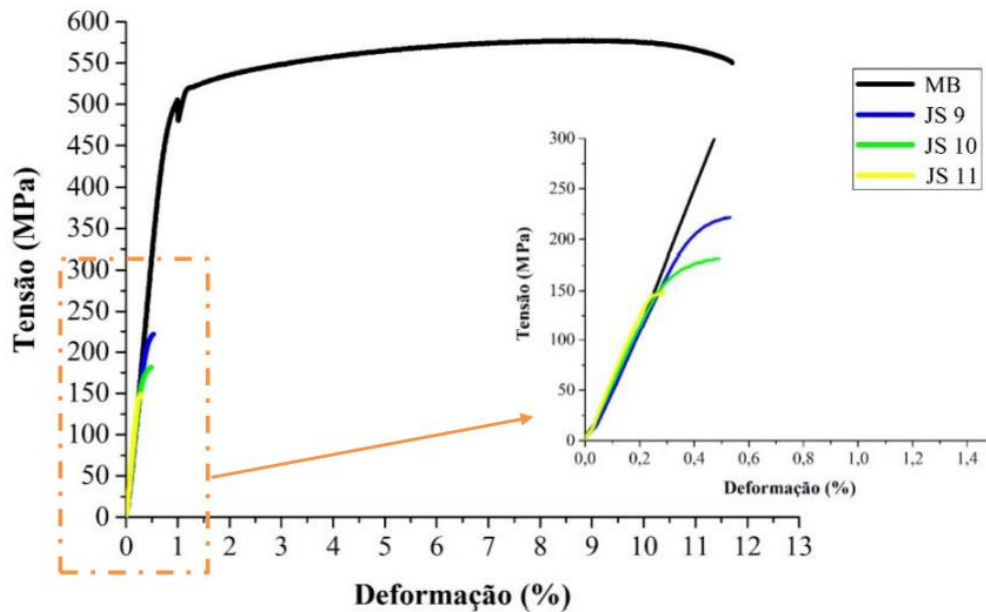
As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração uniaxial são observadas nas Figuras 22 e 23.

Figura 22: Curva tensão-deformação das juntas soldadas (JS) e Material base (MB).



Fonte: Próprio Autor

Figura 23: Curva tensão-deformação das juntas soldadas (JS) de ponto central e Material base (MB).



Fonte: Próprio Autor

As juntas soldadas apresentaram diferentes valores de resistência à tração. Essa diferença pode ser explicada pela diferença do aporte de calor durante cada solda, induzido pela combinação dos parâmetros de processo, gerando zonas com diferentes larguras na região de solda, pela fluidez da mistura do metal e a existência de defeitos (LIMA et al., 2020).

A junta soldada 5 possui maior resistência mecânica, em relação a todas as juntas soldadas. Ainda assim, é possível notar uma redução da resistência à tração da junta 5 em relação ao MB, devido possivelmente ao crescimento e alongamento dos grãos na ZTA, consequência do calor do atrito gerado pela velocidade relativa entre a ferramenta rotativa e o substrato durante o processo FSW (SARSILMAZ, 2018).

As curvas tensão-deformação das juntas soldadas 1-8, observadas na Figura 22, indicam que o ângulo de inclinação da ferramenta foi o parâmetro decisivo sobre a resistência a tração das juntas soldadas, influenciando diretamente na qualidade de mistura no processo FSW, em que as juntas soldadas 5-7 com maior ângulo de inclinação da ferramenta, 3°, apresentaram desempenho relativamente superior as juntas soldadas 1-3 correspondentes (com mesmos valores de velocidade de soldagem e rotação da ferramenta), com menor ângulo de inclinação da ferramenta, 1°, com exceção as juntas soldadas 4 e 8, obtendo desempenho próximo. Entre as juntas soldadas com maior ângulo de inclinação da ferramenta, as juntas 5 e 7, obtidas com menor velocidade de rotação, 410 RPM, apresentaram melhor comportamento tensão-deformação, alcançando maiores valores de Limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT) e deformação até a fratura (DEF).

Enquanto, as juntas soldadas 6 e 8, com maior velocidade de rotação, de 1415 RPM, apresentaram menor desempenho, ocorrendo fratura frágil, sem deformação plástica. Consequência do maior aporte de calor gerado durante o processo.

O aumento da velocidade de rotação da ferramenta levou à uma menor resistência a tração, em razão do maior aporte de calor que leva a maiores temperaturas nas zonas afetadas aumentando os efeitos de crescimento de grão e dissolução de precipitados (LIMA et al., 2020; SHARMA; DWIVEDI; KUMAR, 2012).

As juntas soldadas 9, 10 e 11, de ponto central, proporcionaram desempenho aceitável, com LRT entre 250 e 150 MPa, enquanto as juntas soldadas 2, 3, 4 e 8 apresentam falha catastrófica, sem deformação significativa antes da fratura, devido a presença de defeitos internos verificados por MO.

Os parâmetros de velocidade de rotação da ferramenta, de 410 RPM, velocidade de soldagem, de 48 mm/min, e ângulo de inclinação da ferramenta, de 3°, garantiram um LRT de 357 MPa à junta 5, desempenho convencionalmente superior a juntas soldadas por processo de soldagem a arco (OLABODE et al., 2016; SIVASHANMUGAM et al., 2010; TEMMAR; HADJI; SAHRAOUI, 2011).

6 CONCLUSÃO

Dentre os parâmetros de soldagem testados, a combinação de velocidade de rotação da ferramenta (n) de 410 RPM com a velocidade de soldagem (f) de 48 mm/min e o ângulo de inclinação da ferramenta (a) de 3° forneceram melhor mistura na soldagem, confirmado pela análise dos ensaios mecânicos, e o melhor valores de propriedades mecânicas entre as juntas soldadas. Produzindo a junta de maior desempenho tração-deformação, com uma deformação acima de 50% do MB e uma tensão de até 357 MPa, sem defeitos de soldagem aparentes.

Parâmetros de maiores velocidades de soldagem ($f = 118$ mm/min), maior velocidade de rotação da ferramenta ($n = 1415$ RPM), e menor ângulo de inclinação da ferramenta ($a = 1^\circ$), produziram juntas soldadas de baixa resistência mecânica, devido maior incidência de defeitos de soldagem no LA da ferramenta.

Defeitos de soldagem na ZM (Junta 4 e Junta 8) promoveram uma queda de considerável da dureza, se comparado a juntas íntegras, devido a mistura inadequada, ocorrida possivelmente pela combinação de parâmetros de maior velocidade de soldagem e rotação da ferramenta, gerando maiores esforços para o movimento da ferramenta, diminuindo, desta forma, a homogeneidade da plastificação e mistura, favorecendo a formação de vazios e túneis.

A junta 5 se destacou em todos os ensaios realizados, visualmente se mostrou uma solda de qualidade, no ensaio de microdureza a junta apresentou valores muito aproximado da dureza média e no ensaio de tração a mesma apresentou grande resistência mecânica em relação as demais juntas soldadas.

REFERÊNCIAS

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio – **Alumínio brasileiro: soluções para uma vida sustentável** / Associação Brasileira do Alumínio, 60 p. – São Paulo, 2017.

ALMEIDA, D. T. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (fsw) da liga de alumínio 5182-O**. 2015. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre – RS.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Disponível em: <<https://www.astm.org/>>. Acessado em: 29 de janeiro de 2020.

ASM, METALS HANDBOOK, **Metallography and Microstructures**, vol. 9, 2002.

AVAL, H. J. Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. **Materials & Design**, v. 87, p. 405–413, 2015.

BRASIL ALUMINIO. **A evolução do alumínio / Catálogo de produtos**. Rio de Janeiro. 22p. 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**. [s.l.] John Wiley & Sons NY, 2011. v. 5

CAMMETT, J.; PREVÉY, P., **Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of 10w plasticity burnished 7075- T6**. In: International Aircraft Corosion Workshop, 4., solomons. Proceedings, (2000).

CAPELARI, T. V.; MAZZAFERRO, J. A. E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldagem e Inspecao**, v. 14, n. 3, p. 215–227, 2009.

CAVALIERE, P. Friction stir welding of alloys: Analysis of processing parameters affecting mechanical behavior. **Procedia CIRP**, v. 11, p. 139-144, 2013.

COLAÇO, D. B. **Caracterização e avaliação das tensões residuais em juntas da liga de alumínio AA 5083-0 soldadas pelo processo FSW**. Campina Grande: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 2019.

COLEGROVE, P. A., SHERCLIFF, H. R. “**CFD modelling of friction stir welding of thick plate 7449 aluminium alloy**”, **SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING**, v. 11, n. 4, pp. 429-441, 2006.

DA SILVA, A. A. M. et al. Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds. **Materials and Design**, v. 32, n. 4, p. 2021–2027, 2011.

DAVIS, J. R. Aluminum and Aluminum Alloys. In: **Alloying: Understanding the Basics**. [s.l: s.n.], p.351-416.

FERNANDES, V. K.; MARTENDAL, C. P., **Endurecimento por precipitação em ligas de alumínio**. Engenheiro de Materiais - Santa Catarina, 2016. Disponível em: <<http://engenheirodemateriais.com.br/tag/classificacao-ligas-de-aluminio/>>. Acesso em: 22 de dezembro 2019.

FERREIRA, J. M., TINOCO, J. H., - **Análise da indústria do alumínio no Brasil**. PUC-RIO - monografia de final de curso. Rio de Janeiro, junho de 1999.

FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de Alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6**. 2008. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre – RS.

GARCIA RUANO, Shirley Alexandra. **Avaliação de tensões residuais em Soldas FSW em alumínio 7050 utilizando acustoelasticidade**. – Campinas, SP: [s.n.], 2017. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

GUEDES, S. **Soldadura por fricção linear e por laser da liga Al6082**. 2014. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP.

JI, P. et al. Residual stress distribution and microstructure in the friction stir weld of 7075 aluminum alloy. **Journal of Materials Science**, v. 50, n. 22, p. 7262–7270, 2015.

KOZMINSKI, ELO., **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) do aço inoxidável dúplex UNS S31803** - [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - 2015.

KIM, Y. G. et al. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 415, n. 1–2, p. 250–254, 2006.

LEE, C. Y. et al. The Joint Characteristics of Friction Stir Welded Mg-Zn-Y Alloy. **Materials Science Forum**, v 475-479, p. 555-558, 2005.

MAGGIOLINI, E. et al. Crack path and fracture analysis in FSW of small diameter 6082-T6 aluminium tubes under tension-torsion loading. **International Journal of Fatigue**, v. 92, p. 478-487, 2016.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª edição atualizada - Belo Horizonte. Editora UFMG. 363 p. 2009.

MEHTA, K. P.; BADHEKA, V. J. Effects of Tool Pin Design on Formation of Defects in Dissimilar Friction Stir Welding. **Procedia Technology**, v. 23, p. 513–518, 2016.

MISHRA, R., MA, Z. “**Friction stir welding and processing**”, MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING R-REPORTS, v. 50, n. 1-2, pp. 1-78, 2005.

MIYAURA, Edson Haruo. **Efeito das tensões residuais sobre a propagação de trincas em juntas soldadas por FSW**. – Campinas, SP: [s.n.], 2012. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

NERIS, M. M., **Soldagem**. Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais. CETEC, 51 p. Sao Paulo, 2012.

OLABODE, M. et al. Effect of Al₂O₃ film on the mechanical properties of a welded high-strength (AW 7020) aluminium alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 11, p. 2092–2101, 2016.

POLMEAR, I.J: **The ageing characteristics of ternary aluminium-zincmagnesium alloys**. Journal of the Institute of Metals, Vol. 86, p.113-120, 1957- 1958.

REZA-E-RABBY, M. et al. Joining thick section aluminium to steel with suppressed FeAl intermetallic formation via friction stir dovetailing. **Scripta Materialia**, v. 148, p. 63-67, 2018.

SILVA, Sebastien G. V. B.; **Análise Térmica e Mecânica do Processo Friction Stir Welding**. – Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2019.

SUTTON, M. A. et al. A Study of Residual Stresses and Microstructure in 2024-T3 Aluminum Friction Stir Butt Welds. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 124, n. April, 2002.

TEXIER, D. et al. Fatigue performances of FSW and GMAW aluminum alloys welded joints: Competition between microstructural and structural-contact-fretting crack initiation. **International Journal of Fatigue**, v. 116, n. June, p. 220–233, 2018.

THOMAS, W. M., NICHOLAS, J.C., NEEDHAM, M.G., MURCH, P., TEMPLESMITH, C.J., DAWES, G.B., **Improvements to Friction Welding**. GB Patent Application No. 9125978.8. 1991.

VASUDEVAN, A. K.; DOHERTY, R. D. **Aluminum alloys – Contemporary research and applications**. Academic Press Inc. v.31. p.702. 1993.

YANG, C. et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates. **Materials Characterization**, v. 145, n. June, p. 20–28, 2018.

ZAMAN, N. et al. Mechanical and microstructural behavior of friction stir welded similar and dissimilar sheets of AA2219 and AA7075 aluminium alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 695, p. 2902-2908, 2017.

ZHANG, Z.; LIU, Y.; CHEN, J. Effect of Shoulder Size on the Temperature Rise and the Material Deformation in Friction Stir Welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 45, p. 889–895, 1 dez. 2009.

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso com FC e Correções da Banca

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso com FC e Correções da Banca
Assinado por: Jailton Ferreira
Tipo do Documento: Tese
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jailton Ferreira Moreira, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - CAIND-CZ**, em 09/11/2021 18:58:24.

Este documento foi armazenado no SUAP em 09/11/2021. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 369499

Código de Autenticação: 891051a58b

