



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATTHEUS APOLINÁRIO RIBEIRO

AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
EM JUNTAS SOLDADAS DE LIGAS DE ALUMÍNIO DISSIMILARES
UTILIZANDO O PROCESSO FSW

CAMPINA GRANDE

2019

MATTHEUS APOLINÁRIO RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
EM JUNTAS SOLDADAS DE LIGAS DE ALUMÍNIO DISSIMILARES UTILIZANDO
O PROCESSO FSW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica em nível de mestrado como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Linha de pesquisa: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Dr. Theophilo Moura Maciel

Coorientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

DEDICATÓRIA

R484a Ribeiro, Mattheus Apolinário.
Avaliação de tensões residuais e das propriedades mecânicas em juntas soldadas de ligas de alumínio dissimilares utilizando o processo FSW / Mattheus Apolinário Ribeiro. – Campina Grande, 2019.
94 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel, Prof. Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo".

Referências.

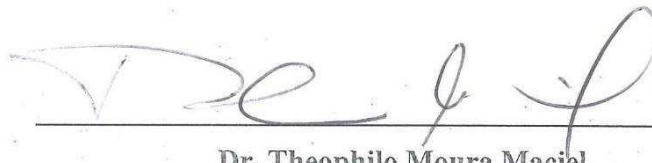
1. Juntas Soldadas. 2. Tensões Residuais. 3. Friction Stir Welding. 4. Planejamento Experimental. 5. Juntas Dissimilares – Ligas Alumínio. 6. Propriedades Mecânicas. I. Maciel, Theophilo Moura. II. Melo, Raphael Henrique Falcão de. III. Título.

CDU 621.791(043)

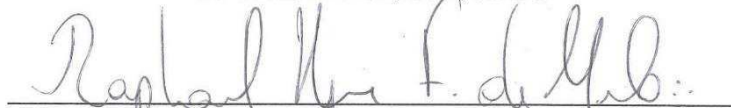
AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM JUNTAS
SOLDADAS DE LIGA DE ALUMÍNIO DISSIMILARES UTILIZANDO O PROCESSO FSW

MATTHEUS APOLINÁRIO RIBEIRO

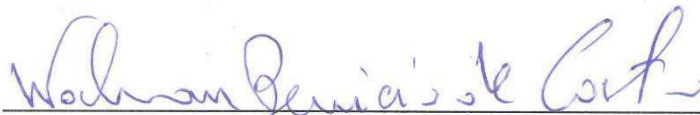
Dissertação Aprovada em 31/05/2019 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



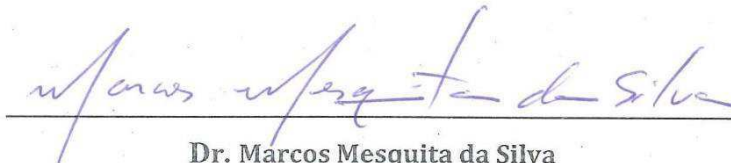
Dr. Theophilo Moura Maciel
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo
Membro Externo - Coorientador
IFPB



Dr. Walman Benício de Castro
Examinador Interno
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marcos Mesquita da Silva
Examinador Externo
IFPB

DEDICATÓRIA

“A persistência é o caminho do êxito.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos.

A minha família, minha base, principalmente a Vera Apolinário e Maria de Souza Apolinário que acreditam em mim, me apoiam e comemoram todas as minhas conquistas.

A minha companheira Déborah Brito Colaço que nunca me deixou desistir e sempre me auxiliou/auxilia em todos os momentos.

Sou eternamente grato aos meus orientadores, Theophilo Moura Maciel e Raphael Henrique Falcão de Melo, por me darem a oportunidade de trabalhar nesta pesquisa e aprender, através de ensinamentos compartilhados, na esfera profissional/acadêmica e pessoal.

Aos professores que fazem parte do PPGEM/UAEM, pelos ensinamentos e auxílios, em especial aos professores João Batista da Costa Agra de Melo, Marco Antônio dos Santos e Walman Benicio de Castro.

Por fim, aos técnicos do laboratório de engenharia mecânica e alunos que auxiliaram no desenvolvimento da dissertação e a todos os amigos do PET de matemática.

RIBEIRO, M. A. Avaliação de Tensões Residuais e das Propriedades Mecânicas em Juntas Soldadas de Ligas de Alumínio Dissimilares Utilizando o Processo FSW. 2019, 90 f. (**Mestrado em Engenharia Mecânica**), Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2019.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar os níveis de tensões residuais e as propriedades mecânicas em juntas dissimilares das ligas de Alumínio AA 5083-O e AA 7075-T651 soldadas utilizando o processo *Friction Stir Welding* (FSW). Inicialmente, foi realizada a soldagem das juntas dissimilares de ligas de alumínio utilizando um Planejamento Experimental do tipo $2^3 + 3$ pontos centrais e então a avaliação da influência de cada parâmetro de soldagem adotado sobre as propriedades mecânicas através do *software Statistica*®. Para determinação das tensões residuais foi realizada uma variação da técnica do furo cego utilizando, para medições, a mesa de coordenadas. Para caracterização mecânica, foram realizados a inspeção visual e os ensaios de tração uniaxial, dureza Vickers e dobramento de raiz à 60°. Dentre os resultados da inspeção visual foi possível perceber que as soldagens ocorreram de forma satisfatória, sem apresentar defeitos aparentes. Com relação as propriedades mecânicas, o parâmetro de soldagem 2 (velocidade de rotação: 350 RPM, velocidade de avanço: 180 mm/min e *offset*: 0 mm) obteve maior valor de limite de resistência à tração e de carga máxima suportada. Em termos de tensão residual, o parâmetro 2 e o parâmetro 3 (velocidade de rotação: 870 RPM, velocidade de avanço: 40 mm/min e *offset*: 0 mm) forneceram entradas de energia adequadas para redução dos níveis de tensões residuais.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, Planejamento Experimental, juntas dissimilares de ligas de alumínio, propriedades mecânicas.

RIBEIRO, M. A. Evaluation of Residual Tensions and Mechanical Properties in Welded Joints of Dissimilar Aluminum Alloys Using the FSW Process. 2019, 90 f. (**Master's degree in Mechanical Engineering**), Federal University of Campina Grande. Graduate Program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2019.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the residual stress levels and the mechanical properties in dissimilar joints of the alloys AA 5083-O and AA 7075-T651 welded using the Friction Stir Welding (FSW) process. Initially, it was carried out the welding of the dissimilar joints of aluminum alloys using an Experimental Planning of the type $2^3 + 3$ central points and then the evaluation of the influence of each welding parameter adopted on the mechanical properties through the software Statistica®. To determine the residual stresses, a variation of the blind hole technique was performed using, for measurements, the coordinate table. For mechanical characterization, it was performed visual inspection and uniaxial tension tests, Vickers hardness and bending test at 60°. Among the results of the visual inspection it was possible to notice that the welds occurred satisfactorily, without presenting any apparent defects. Regarding the mechanical properties, the welding parameter 2 (rotation speed: 350 RPM, travel speed: 180 mm/min and offset: 0 mm) obtained a higher limit value of tensile strength and maximum load. In terms of residual voltage, parameter 2 and parameter 3 (rotation speed: 870 RPM, travel speed: 40 mm/min and offset: 0 mm) provided adequate power inputs to reduce the residual stress levels.

Keywords: Friction Stir Welding, Experimental Planning, dissimilar joints of aluminum alloys, mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fivela em ouro com partes brasadas, datado de 700 d.C. (Museu de Colônia - Alemanha).

Figura 2: Cronologia dos processos de soldagens.

Figura 3: Processo FSW.

Figura 4: Esquema da seção transversal de uma soldagem FSW, ilustrando as diferentes zonas: (A) Metal Base, (B) Zona Termicamente Afetada, (C) Zona Termomecanicamente afetada, (D) Zona Misturada.

Figura 5: Relação entre velocidade de rotação e picos de temperatura no processo FSW.

Figura 6: Esquema do *offset*.

Figura 7: Esquema de inclinação da ferramenta FSW.

Figura 8: Defeito de superfície - excesso de rebarba.

Figura 9: Área das porosidades em função da velocidade de avanço da ferramenta.

Figura 10: Área das porosidades em função do ângulo de inclinação da ferramenta.

Figura 11: Esquema de uma ferramenta FSW.

Figura 12: Esquema de diferentes ferramentas FSW.

Figura 13: Boxplot dos valores de dureza Vickers para as 12 ferramentas avaliadas.

Figura 14: Principais valores obtidos no ensaio de tração uniaxial.

Figura 15: Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.

Figura 16: Junta de alumínio com a liga AA 5083-O no lado de avanço (A) e a liga AA 7075-T651 no lado de recuo (R).

Figura 17: Esquema das juntas de alumínio utilizadas na soldagem e suas dimensões em milímetros.

Figura 18: Ferramenta de Soldagem de pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada.

Figura 19: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat com a ferramenta de pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada conectado.

Figura 20: Máquina universal de ensaios MTS, modelo 810, adaptada para tração uniaxial.

Figura 21: Corpo de prova do ensaio de tração.

Figura 22: Corpo de prova do ensaio de dobramento de raiz a 60°.

Figura 23: Máquina de ensaio universal MTS, modelo 810, adaptada para dobramento de raiz a 60°.

Figura 24: Esquema do ensaio de dureza Vickers.

Figura 25: Microdurômetro digital FM-700 da FutureTech

Figura 26: Ilustração das distâncias em milímetros entre os furos para medição das tensões residuais.

Figura 27: Influência do *offset* e da rotação sobre o limite de resistência a tração.

Figura 28: Influência do *offset* e da rotação sobre a carga máxima.

Figura 29: Influência do *offset* e da rotação sobre a deformação.

Figura 30: Curva tensão-deformação para as juntas soldadas de alumínio pelo processo FSW e dos Metais de Base.

Figura 31: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 0 mm.

Figura 32: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 1 mm.

Figura 33: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 0,5 mm.

Figura 34: Boxplot dos valores de dureza para os onze parâmetros de soldagem.

Figura 35: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 40 mm/min.

Figura 36: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 40 mm/min.

Figura 37: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 180 mm/min.

Figura 38: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 180 mm/min.

Figura 39: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 110 mm/min.

Figura 40: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 110 mm/min.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo de algumas características do alumínio.

Quadro 2: Classificação das ligas de alumínio em função dos principais elementos de adição.

Quadro 3: Designação da condição das ligas não tratáveis termicamente.

Quadro 4: Designação da condição das ligas tratáveis termicamente.

Quadro 5: Composição química de ligas de alumínio–magnésio.

Quadro 6: Composição química de ligas de alumínio–zinco.

Quadro 7: Perfis da geometria do pino da ferramenta.

Quadro 8: Carga máxima suportada no ensaio de dobramento para as juntas soldadas pelas 12 ferramentas diferentes.

Quadro 9: Composição química nominal da liga de alumínio AA 7075-T651.

Quadro 10: Composição química nominal da liga de alumínio AA 5083-O.

Quadro 11: Níveis dos fatores em estudo.

Quadro 12: Parâmetros do planejamento 2^3 com 3 pontos centrais da soldagem dissimilar pelo processo FSW.

Quadro 13: Matriz de planejamento com resultados.

Quadro 14: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 95%.

Quadro 15: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 90%.

Quadro 16: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Limite de resistência a tração.

Quadro 17: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Deformação.

Quadro 18: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Carga Máxima.

Quadro 19: Inspeção visual da soldagem por FSW da junta dissimilar AA 5083-O e AA 7075-T651.

Quadro 20: Valores das cargas e deslocamentos máximos suportados no ensaio de dobramento a 60°.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

FSW – *Friction Stir Welding*

AA - *Alluminum Association*

O – Recozimento

T651 – Envelhecimento Artificial

IACS – *International Annealed Copper Standard*

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

AWS – *American Welding Society*

TWI – *The Welding Institute*

MB – Metal de base

ZM – Zona misturada

ZTA – Zona termicamente afetada

ZTMA – Zona termomecânica afetada

LE – Limite de escoamento

LRT – Limite de resistência à tração

DEF – Deformação sob tração

CM – Carga Máxima

Offset – Deslocamento transversal ao cordão de solda

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFPB – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

σ_x - Magnitude da tensão residual longitudinal

σ_y - Magnitude da tensão residual transversal

E - Módulo de elasticidade

ν - Coeficiente de Poisson

ϵ_x - Deformação característica na direção longitudinal

ϵ_y - Deformação característica na direção transversal

VA – Velocidade de avanço

VR – Velocidade de Rotação

OS – *Offset*

ANOVA – Análise de variância

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	18
1.1. Introdução	18
1.2. Justificativa	19
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo geral	20
1.3.2. Objetivos específicos.....	20
1.4. Disposição da escrita	20
CAPÍTULO II.....	22
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. O alumínio e suas ligas	22
2.1.1. Ligas da série 5XXX	27
2.1.2. Ligas da série 7XXX	28
2.2. Soldagem	29
2.2.1. Friction Stir Welding (FSW).....	31
2.2.1.1. Vantagens e desvantagens do Friction Stir Welding.....	34
2.2.1.2. Parâmetros de soldagem.....	35
2.2.1.3. Defeitos oriundos do processo FSW	37
2.2.1.4. Geometria da Ferramenta	40
2.3. Tensões Residuais	44
2.3.1. Tensões residuais em juntas soldadas	44
2.4. Planejamento Experimental	46
CAPÍTULO III	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1. Desenvolvimento da pesquisa	49
3.2. Materiais.....	50
3.3. Processos de soldagem.....	52
3.3.1. Definição dos equipamentos de soldagem	52
3.3.2. Definição dos parâmetros de soldagem.....	53
3.4. Metodologia dos ensaios.....	55
3.4.1. Ensaio mecânico de tração uniaxial	55
3.4.2. Ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60°	56
3.4.3. Ensaio mecânico de dureza Vickers	58

3.4.4. Medições das tensões residuais	59
CAPÍTULO IV	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1. Planejamento experimental	61
4.1.1. Influência dos parâmetros de soldagem sobre o limite de resistência a tração	65
4.1.2. Influência dos parâmetros de soldagem sobre a carga máxima	66
4.1.3. Influência dos parâmetros de soldagem sobre a deformação	67
4.2. Inspeção Visual	68
4.3. Ensaio mecânico de tração uniaxial	71
4.4. Ensaio mecânico de dureza Vickers	73
4.5. Ensaio para medição de tensões residuais	76
4.6. Ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60°	81
CAPÍTULO V	83
5. CONCLUSÕES	83
6. REFERÊNCIAS	84

CAPÍTULO I

1.1. Introdução

Atualmente, um padrão de produtos com alto índice de qualidade e economia são os objetivos requeridos pelas indústrias. A crescente demanda por itens de maior qualidade e durabilidade atrelados à redução de consumo através da redução de peso do material e a preservação do meio ambiente, faz com que a utilização do alumínio venha experimentando um constante crescimento nos setores da indústria automotiva, naval e aeronáutica, visto que a combinação de baixa densidade, alta resistência à corrosão, boa tenacidade, excelente conformabilidade e reciclabilidade garantem sua utilização em escala industrial (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A versatilidade do alumínio em formar diferentes ligas em função da grande solubilidade de diferentes elementos de liga na matriz do alumínio torna as ligas de alumínio extremamente atrativas para aplicações de engenharia tendo em vista que estas ligas atendem os requisitos de boa tenacidade, reciclabilidade e excelente conformabilidade (SANTOS, 2009).

Para cada componente a ser fabricado a escolha das ligas a serem empregadas será o fator crítico para a seleção de uma determinada liga em detrimento de outra, pois serão os elementos de liga presentes que determinarão o desempenho dos componentes em serviço.

As ligas de alumínio se classificam em ligas tratáveis termicamente ou endurecidas por tratamento térmico, que têm sua resistência mecânica aumentada pela formação de precipitados de fases como as ligas da série 2XXX e 7XXX (PAO *et al.*, 2001), e as ligas endurecidas por deformação a frio, que têm o aumento de resistência mecânica pela deformação mecânica a frio, tais como as ligas 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX.

As ligas da série 5XXX possuem uma excelente soldabilidade e ductilidade, enquanto as ligas da série 7XXX apresentam alta resistência mecânica e uma difícil soldabilidade, sendo notável o grande contraste entre elas. Para a realização da união de ligas extremamente diferentes como as citadas, os processos tradicionais de soldagem por fusão ao arco elétrico apresentam resultados de baixo rendimento, com o aparecimento de vários problemas nas peças unidas, como porosidade, falta de preenchimento e um alto estado de tensões residuais que surgem devido a temperatura extremamente alta que estes processos proporcionam.

Assim, a soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW - *Friction Stir Welding*) torna-se uma alternativa para a realização de soldagens de ligas dissimilares, já que a mesma é realizada no estado sólido, evitando as desvantagens da soldagem por fusão (GUO *et al.*, 2014).

As vantagens que um processo como o FSW pode trazer são: a capacidade de unir os materiais em um único passe, não alterar a composição química do material de base e proporcionar melhor relação custo/benefício quando comparado com processos de soldagem ao arco elétrico. Por se tratar de soldagem no estado sólido por aplicação de pressão realizando trabalho mecânico, propicia o refino de grão garantindo maior resistência mecânica à junta (STELL *et al.*, 2010).

Além das vantagens citadas acima, o processo FSW proporciona uma união adequada entre ligas de difícil compatibilidade, como as ligas da série 5XXX e 7XXX, realizando a soldagem em temperaturas abaixo do ponto de fusão, gerando assim um estado de tensões residuais menor e conseqüentemente aumentando a vida útil da junta.

Embora o processo FSW tenha merecido destaque, sendo objeto de estudo em diversos centros de pesquisa tecnológica no exterior, pouco se tem observado quanto a trabalhos realizados inteiramente no Brasil, especialmente no que se trata de soldagem dissimilar de ligas de alumínio (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009).

Neste contexto, avaliar os níveis de tensões residuais e as propriedades mecânicas em juntas dissimilares de alumínio soldadas utilizando o processo *Friction Stir Welding* (FSW) é de relevante interesse para a consolidação da tecnologia e sua conseqüente aplicação na indústria.

1.2. Justificativa

As ligas de alumínio vêm assumindo destaque nas indústrias automotivas e aeronáuticas por suas características de baixo peso e razoável resistência mecânica. Entretanto a soldagem dessas ligas por processo convencional por fusão ao arco elétrico requer muita habilidade manual e cuidados na preparação e execução da operação, estando sujeitas ao aparecimento de porosidades e trincas de solidificação, impedindo de serem utilizadas por este processo de união em aplicações de alta responsabilidade como no setor aeronáutico.

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (*Friction Stir Welding* (FSW)),

por ser um método relativamente novo se apresenta como uma alternativa aos métodos tradicionais de soldagem, necessitando de mais estudos e análises para este fim. Neste sentido, é importante estabelecer os parâmetros de soldagem que proporcionem juntas soldadas por este processo com melhores propriedades mecânicas e que diminuam os níveis de tensões residuais presentes nas juntas, principalmente por se tratar de juntas dissimilares em que este problema pode se agravar podendo induzir a fraturas catastróficas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar os níveis de tensões residuais e as propriedades mecânicas em juntas dissimilares das ligas de alumínio AA 5083-O e AA 7075-T651 soldadas utilizando o processo *Friction Stir Welding* (FSW).

1.3.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos foram determinados os melhores parâmetros de soldagem utilizando o Planejamento Experimental Fatorial, os perfis de tensões residuais das juntas soldadas e a resistência à tração e os perfis de microdureza das juntas de alumínio dissimilares. Avaliar a microestrutura das juntas soldadas e correlacionar as propriedades mecânicas e os perfis de microdureza com as tensões residuais resultantes nas juntas soldadas, com a finalidade de avaliar o melhor parâmetro de soldagem também será objetivo deste trabalho.

1.4. Disposição da escrita

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, distribuídos em:

- Capítulo I: que apresenta uma introdução sobre o trabalho, proporcionando uma visão geral sobre o tema, sua importância no mercado atual e os principais objetivos traçados na dissertação.

- Capítulo II: que proporciona uma abordagem do assunto de uma forma mais específica, definindo sobre o alumínio e suas ligas, principalmente sobre as ligas em estudo, o surgimento das tensões residuais, além de descrever o processo de soldagem utilizado na pesquisa e suas principais características.
- Capítulo III: fornece a metodologia aplicada para alcançar os objetivos traçados, os principais métodos, ensaios e equipamentos utilizados.
- Capítulo IV: contém os resultados da pesquisa: Planejamento experimental, inspeção visual e resultados dos ensaios de tração, dureza, perfis de tensões residuais, dobramento além de uma correlação com os resultados encontrados na literatura.
- Capítulo V: onde são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos, baseando-se nos resultados obtidos a partir dos testes experimentais e literaturas dispostas ao longo deste trabalho.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

Uma análise sobre as matérias fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada neste capítulo. Os assuntos abordados e subdivididos em tópicos serão apresentados da seguinte maneira: Características do alumínio e suas ligas, principalmente as ligas da série 7000 e 5000, objetos da pesquisa; processos de soldagem, principalmente sobre o processo FSW e a utilização de Planejamento Experimental na pesquisa.

2.1. O alumínio e suas ligas

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre (os mais abundantes são o oxigênio e o silício) e, como elemento metálico, é o mais abundante, sendo também o metal não-ferroso mais utilizado pela sociedade. A alta afinidade do alumínio com o oxigênio, não torna possível encontrá-lo na sua forma metálica na natureza, e sim na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3) (ABAL, 2007).

A Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2007), destaca o fato do alumínio poder ser transformado facilmente em diferentes tamanhos, espessuras e formatos. O alumínio pode ser laminado em qualquer espessura e extrudado numa infinidade de perfis, podendo ser também, forjado. A facilidade e a velocidade com o qual o alumínio pode ser usinado é outro importante fator que contribui para difundir o uso desse material, o qual também, pode ser unido praticamente por todos os métodos de união, tais como rebitagem, brasagem, colagem e a soldagem que é o tema deste estudo.

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral. Segundo dados da ABAL (2007), Callister (2002) e IACS (*International Annealed Copper Standard*), suas principais propriedades são:

- Temperatura de fusão: 660,2°C relativamente baixo se comparado a 1570°C do aço;
- Peso Específico: A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu

peso específico é de cerca de $2,70 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre;

- Resistência à corrosão: O alumínio possui uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão;
- Condutibilidade elétrica: O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62%, a qual associada à sua baixa densidade significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro;
- Condutibilidade térmica: O alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço;
- Refletividade: O alumínio tem uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias;
- Propriedade antimagnética: Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis;
- Característica de barreira: O alumínio é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens;
- Reciclagem: A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens do alumínio.

Algumas dessas propriedades do alumínio, além de outras não mencionadas, estão resumidas no quadro 1.

Quadro 1: Resumo de algumas características do alumínio.

PROPRIEDADES GERAIS DO ALUMÍNIO	
Peso específico (20°C)	2,70 g/cm ³
Temperatura de fusão	660,2 °C
Temperatura de ebulição	2467 °C
Condutibilidade térmica (25°C)	0,53 Cal/cm/°C
Condutibilidade elétrica	62% IACS
Limite de resistência (recozido)	4,8 kgf/mm ²
Limite de escoamento (recozido)	1,0 kgf/mm ²
Alongamento (recozido)	65%
Refletividade	Acima de 80%

Fonte: Modificado de Callister, 2002.

Apesar das mais variadas vantagens, o alumínio na sua forma pura é um metal que possui uma resistência mecânica relativamente baixa (aproximadamente 5,0 kgf/mm²), sendo um fator limitador para sua aplicação na indústria (COCK, 1999).

Entretanto, a versatilidade do alumínio em formar diferentes ligas em função da grande solubilidade de diferentes elementos de liga na matriz do alumínio, torna as ligas de alumínio extremamente atrativas para aplicações de engenharia, contornando a limitação da baixa resistência mecânica (SANTOS, 2009).

A ampla aplicabilidade das ligas de alumínio na indústria química e petroquímica pode ser observada na fabricação de variados equipamentos de processo (ENGLER *et al.*, 2013; GUTENSOHN *et al.*, 2008). Para cada componente a ser fabricado a escolha das ligas a serem empregadas será o fator crítico para a seleção de uma determinada liga em detrimento de outra, pois serão os elementos de liga presentes que determinarão o desempenho dos componentes em serviço. A classificação das ligas é feita com um número de série para cada elemento químico. O quadro 2 mostra as séries correspondentes a cada elemento químico de uma liga.

Quadro 2: Classificação das ligas de alumínio em função dos principais elementos de adição.

Designação da série	Principal Elemento Ligante
1XXX	Alumínio com mínimo de 99,00% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: Modificado de White Martins, 2017.

As ligas do grupo 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX, geralmente não são tratáveis termicamente, enquanto que as ligas do grupo 2XXX, 6XXX e 7XXX, normalmente são tratadas termicamente. Os principais tratamentos para as ligas do grupo tratável são o tratamento de solubilização e o de envelhecimento, podendo ainda utilizar encruamento antes do envelhecimento para maximizar o aumento de resistência mecânica. Os quadros 3 e 4 representam a designação da condição das ligas não tratáveis termicamente e a designação da condição das ligas tratáveis termicamente, respectivamente (MODENESI, 2011).

Quadro 3: Designação da condição das ligas não tratáveis termicamente.

Designação	Condição
-O	Recozido (para produtos trabalhados mecanicamente e recozidos até o maior amaciamento possível).
-F	Como fabricado (para produtos processados sem um controle específico das condições de fabricação).
-H1*	Encruado (para produtos trabalhados a frio sem recozimento posterior).
-H2*	Encruado e parcialmente recozido (para produtos encruados acima da resistência desejada e parcialmente recozidos até a resistência desejada).
-H3*	Encruado e estabilizado (para produtos tratados a baixa temperatura para reduzir ligeiramente a sua resistência e evitar o seu amaciamento progressivo à temperatura ambiente).

Fonte: Modenesi, 2011.

Quadro 4: Designação da condição das ligas tratáveis termicamente.

Designação	Condição
-O	Recozido (para produtos trabalhados mecanicamente e recozidos até o maior amaciamento possível).
-F	Como fabricado (para produtos processados sem um controle específico das condições de fabricação).
-W	Solubilizado (para produtos submetidos ao tratamento de solubilização).
-T1*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T2*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T3*	Envelhecido (Produto solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável)
-T4*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T5*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido artificialmente).
-T6*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido artificialmente).
-T7*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido artificialmente até uma condição além da de resistência máxima).
-T8*	Envelhecido (Produto solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente).
-T9*	Envelhecido (Produto solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado).
-T10*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido artificialmente).

Fonte: Modenesi, 2011.

2.1.1. Ligas da série 5XXX

As ligas de alumínio da série 5XXX possuem como principal elemento de liga o magnésio, sendo também chamadas de ligas de alumínio-magnésio (Al-Mg). Como visto anteriormente, as ligas de Al-Mg não são tratáveis termicamente, dessa forma são endurecidas por soluções sólidas e por encruamento (MODENESI, 2011). As ligas desta série possuem como principais características a alta resistência à corrosão, o bom desempenho em processos de anodização, a excelente soldabilidade e ductilidade (METALTHAGA, 2019). Devido as suas características, principalmente a resistência à corrosão, as ligas da série 5XXX são aplicadas em barcos e cascos, tanques de combustíveis, recipientes de alta pressão, implementos agrícolas e rodoviários, entre outros.

As variadas ligas de alumínio-magnésio contidas no grupo da série 5XXX possuem quantidade em porcentagem de magnésio diferentes entre si, além da possibilidade de adição de outros elementos ligantes, como por exemplo o manganês, o cromo e o titânio. No entanto, o teor de Mg nas ligas não pode exceder os 5,5% em peso, pois valores acima deste podem promover a formação de precipitados que aceleram o fenômeno da corrosão sob tensão e o trincamento intergranular (BRAY, 1992). No quadro 5 é possível observar a composição química de algumas ligas de alumínio-magnésio.

Quadro 5: Composição química de ligas de alumínio–magnésio.

LIGAS DE ALUMÍNIO – MAGNÉSIO					
LIGA AA	Mg (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ti (%)	Al
5005	0,8	-	-	-	Balanço
5042	3,5	0,35	-	-	Balanço
5052	2,5	-	0,25	-	Balanço
5252	2,5	-	-	-	Balanço
5454	2,7	0,8	0,12	-	Balanço
5654	3,5	-	0,25	0,10	Balanço
5456	5,1	0,8	0,12	-	Balanço
5457	1,0	0,30	-	-	Balanço
5182	4,5	0,35	-	-	Balanço
5083	4,4	0,7	0,15	-	Balanço
5086	4,0	0,45	0,15	-	Balanço

Fonte: Infomet, 2018.

2.1.2. Ligas da série 7XXX

As ligas da série 7XXX, são ligas de alumínio e zinco (Al-Zn) que são sensíveis ao tratamento térmico. As ligas da série 7XXX possuem baixa resistência à corrosão e uma difícil soldabilidade, contrastando com as ligas da série 5XXX neste aspecto, porém, as ligas de alumínio-zinco tem um alto limite de resistência à tração e alto limite de escoamento, apresentando resistência mecânica similar ao aço no mesmo peso, além de atingir altíssimos valores de dureza (SANTOS, 2009).

A aplicabilidade das ligas Al-Zn inclui a indústria militar, desenvolvimento de ferramentas e indústria aeroespacial. Pequenas porcentagens de magnésio, cobre e cromo podem ser elementos de liga complementares da série, que podem promover um aumento da resistência mecânica e da resistência à corrosão dependendo da combinação e da porcentagem em peso utilizada (COPPERMETAL, 2018; SANTOS, 2009). O quadro 6 mostra a composição química de algumas ligas de alumínio da série 7XXX.

Quadro 6: Composição química de ligas de alumínio–zinco.

LIGAS DE ALUMÍNIO–ZINCO								
LIGA AA	Zn (%)	Mg (%)	Cu (%)	Mn (%)	Cr	Zr	Ti	Al
7001	7,4	3,0	2,1	-	0,26	-	-	Balanço
7005	4,5	1,4	-	0,45	0,13	0,14	0,03	Balanço
7016	4,5	1,1	0,8	-	-	-	-	Balanço
7021	5,5	1,5	-	-	-	0,13	-	Balanço
7029	4,7	1,6	0,7	-	-	-	-	Balanço
7049	5,6	2,5	1,6	-	0,16	-	-	Balanço
7050	6,2	2,2	2,3	-	-	0,12	-	Balanço
7150	6,4	2,4	2,2	-	-	-	-	Balanço
7075	5,6	2,5	1,6	-	0,23	-	-	Balanço
7475	5,7	2,2	1,6	-	0,22	-	-	Balanço
7076	7,5	1,6	0,6	0,50	-	-	-	Balanço
7178	6,8	2,7	2,0	-	0,23	-	-	Balanço

Fonte: Infomet, 2018.

2.2.Soldagem

Existem várias definições para soldagem, uma delas é como o processo de união localizado de metais ou não-metais, por meio da fusão ou não das peças (MACHADO, 1996), sendo um dos mais importantes processos, se não o mais importante, de fabricação de componentes metálicos. Outra definição é a adotada pela *American Welding Society* – AWS (1980), mencionando soldagem como a operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.

A soldagem de materiais é um procedimento antigo e seu início data de milhares de anos, como mostrado na Figura 1, através da técnica brasagem. Essa técnica consiste de um procedimento térmico onde o metal de adição atinge a fase fluida pela fusão e reveste ou preenche o material de base, que de forma contrária ao metal de adição, não atinge a temperatura de fusão. Segundo Okimoto (2005), a soldagem por brasagem é provavelmente a forma mais antiga de união de materiais, excluindo os meios mecânicos, com joias brasadas datadas de 1500 a 4000 a.C. expondo assim, a importância do método de soldagem para obtenção de peças com diferentes características e funcionalidades para os mais diversos grupos, desde as mais antigas sociedades.

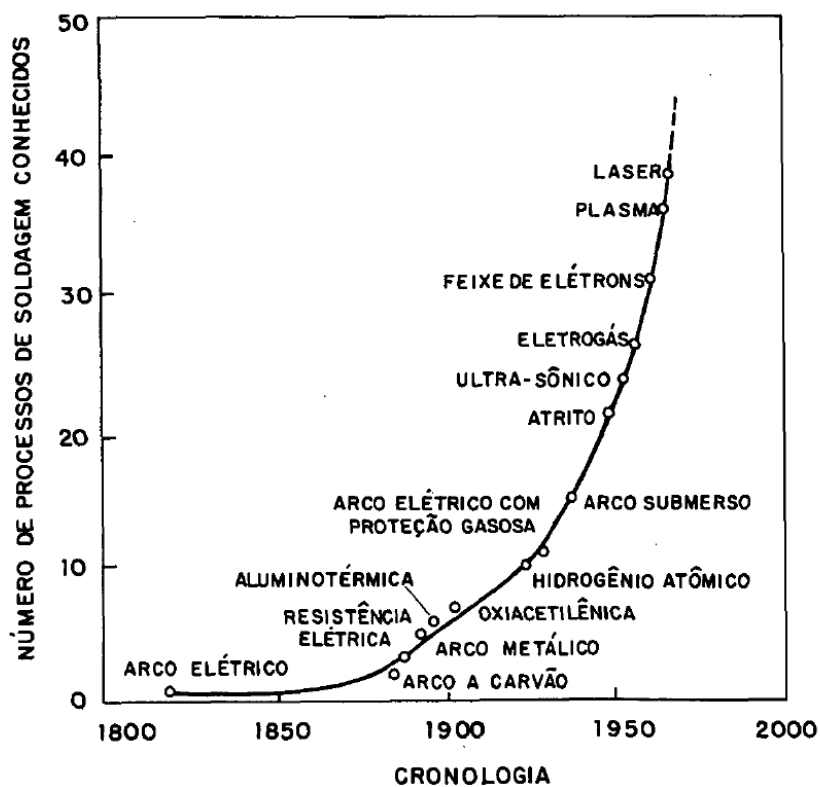
Figura 1: Fivela em ouro com partes brasadas, datado de 700 d.C. (Museu de Colônia - Alemanha).



Fonte: Okimoto, 2005.

Com a descoberta do fenômeno do arco elétrico por Sir Humphey Davis em 1801, a técnica moderna da soldagem começa a ser moldada, levando ao primeiro depósito de patente da soldagem por arco elétrico através de N. Bernardos e S. Olsewski em 1885 (NERIS, 2012). A Figura 2 ilustra o histórico evolutivo, de acordo com a data de criação, dos processos de soldagem desde os princípios de sua moldagem através do arco elétrico no início do século XVIII.

Figura 2: Cronologia dos processos de soldagens.



Fonte: Wainer *et al.*, 1992.

De acordo com Wainer *et al.* (1992), e corroborado pela Figura 2, durante a Primeira e a Segunda Guerra Mundial ocorreu a criação de um grande número de metodologias de soldagem. Devido a Primeira Guerra Mundial, a técnica da soldagem passou a ser mais utilizada na fabricação de artefatos, e a Segunda Guerra Mundial trouxe avanços para essa tecnologia, com o desenvolvimento de novos processos e o aperfeiçoamento dos já existentes.

O procedimento de soldagem possui diversas vantagens em relação aos processos mecânicos como, por exemplo, a rebitagem. As principais vantagens são: Redução de peso, economia de material e tempo, maior estanqueidade, a operação pode ser manual, mecanizada

ou automática, aplicável a diversos materiais, grande variedade de processos, entre outras. Porém, essa técnica não possui apenas vantagens, mas também desvantagens características do processo, como: Impossibilidade de desmontagem, causa distorções e tensões residuais, requer operador habilidoso, afeta a microestrutura dos materiais e pode exigir operações auxiliares (MODENESI *et al.*, 2012).

Nos dias atuais, estima-se um total de mais de 70 diferentes processos de soldagem, sendo este número dinâmico devido as mais variadas pesquisas e projetos relativos a este tema (NERIS, 2012). Os processos são divididos em dois grandes grupos: Soldagem por fusão e soldagem por pressão.

A soldagem por fusão é o método no qual as juntas soldadas são fundidas através da ação de energia elétrica ou química, sem que ocorra a aplicação de pressão (SENAI, 1996). A aplicação localizada de calor na região da união para fusão do metal de adição, se utilizado, produzirá a ligação entre os metais por meio da solidificação posterior (MODENESI *et al.*, 2012). Soldagem a laser, soldagem a gás, soldagem a plasma e soldagem a arco elétrico são exemplos de metodologias para aplicação da união por fusão.

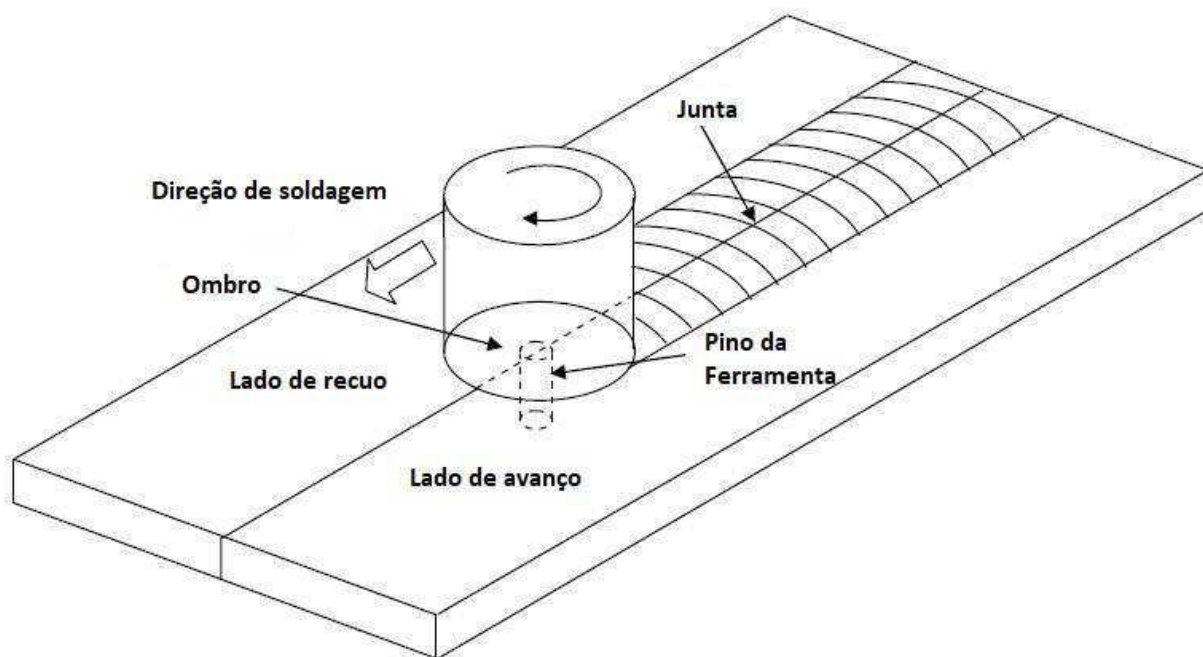
Já a soldagem por pressão utiliza força e um aquecimento local limitado, com ou sem material de adição, obtendo a união principalmente pela deformação do material confinado. Como o calor gerado não atinge o ponto de fusão do material, este procedimento é assim considerado uma soldagem sólido-sólido (BATALHA, 2001). Soldagem por ultrassom, soldagem por explosão, soldagem por indução de alta frequência e a soldagem por fricção, sendo esta última objeto de estudo deste trabalho, são exemplos de métodos para união através de pressão.

2.2.1. *Friction Stir Welding* (FSW)

A técnica de soldagem *Friction Stir Welding* foi criada pelo *The Welding Institute* (TWI) no Reino Unido em 1991, e é um método de união no estado sólido, inicialmente aplicada apenas para as ligas de alumínio, com um conceito relativamente simples. Uma ferramenta rotativa não consumível composta de um ombro e um pino de geometria específica é inserida entre as bordas das diferentes peças a serem soldadas. O ombro então faz um contato firme com a superfície das peças e o pino deve penetrar em uma espessura adequada, de forma que não

atravessa as peças e assim evita problemas de mistura na raiz da peça final. A ferramenta rotacionando e transladando pelas peças de alumínio gera calor por fricção, aumentando a ductilidade e deformando plasticamente o material, assim ocorrendo a movimentação necessária para a mistura e união entre as peças, formando a junta soldada (MISHRA; MA, 2005). A Figura 3 esquematiza o processo FSW.

Figura 3: Processo FSW.



Fonte: Modificado de Nandan *et al.*, 2008.

Segundo Nandan *et al.* (2008), a junta onde a direção de rotação é a mesma da direção de soldagem é chamada lado de avanço, já a outra junta é designada como lado de recuo. Essa diferença pode levar a assimetria na transferência de calor, no fluxo de materiais e nos dois lados da solda, ocasionando mudanças nas propriedades mecânicas e nas tensões residuais (CHO *et al.*, 2005).

O pino, anexo ao ombro, compondo a ferramenta possui comprimento menor do que a espessura das placas, é responsável pelo transporte e fluxo do material. O ombro por sua vez, possui diâmetro maior do que o pino, sendo a parte da ferramenta com o objetivo de gerar a maior parte do calor por atrito e por delimitar a região soldada, contendo o material plastificado nessa zona. A geometria do pino e do ombro da ferramenta pode ser modificada, implicando diretamente na mistura dos materiais e na geração de calor (KUMAR *et al.*, 2013).

O processo *Friction Stir Welding* envolve interações complexas entre os materiais, que podem ser observadas na Figura 4, que ilustra uma seção transversal de uma soldagem FSW, mostrando as diferentes zonas geradas pelo processo.

Figura 4: Esquema da seção transversal de uma soldagem FSW, ilustrando as diferentes zonas: (A) Metal Base, (B) Zona Termicamente Afetada, (C) Zona Termomecanicamente afetada, (D) Zona Misturada.



Fonte: Frigaard *et al.*, 2001.

A zona misturada (ZM) consiste na região central da solda. Nessa área o aporte de calor é considerado suficiente para fundir/misturar os materiais em união. A solidificação e o resfriamento dessa região têm influência direta na qualidade da solda. A zona termicamente afetada (ZTA) é a região em que houve modificação na microestrutura do material devido ao aporte de calor durante a soldagem. A temperatura nessa área não foi o suficiente para ocorrer a fusão/mistura, porém o necessário para ocorrer pequenas transformações como: crescimento de grãos, dissolução de precipitados e recozimento. A zona termomecanicamente afetada (ZTMA) consiste na região em que teve modificações na microestrutura do material de base devido tanto aos processos térmicos como aos esforços mecânicos suportados durante a soldagem (ÇAM; MISTIKOGLU, 2014).

A qualidade do cordão de solda e da peça final como um todo, depende diretamente da mistura e da geração de calor no processo, que vão gerar as zonas anteriormente mencionadas.

Mishra e Ma (2005) citam a técnica FSW como uma tecnologia “verde”, devido a eficiência energética, versatilidade e a compatibilidade ambiental. Em comparação aos métodos

convencionais de soldagem, FSW consome menos energia, não utiliza gás ou outros fluidos e possibilita a união de juntas sem a utilização de metais de adição.

2.2.1.1. Vantagens e desvantagens do *Friction Stir Welding*

A técnica *Friction Stir Welding* é muito flexível, podendo preparar uniões de materiais em até três dimensões e distorções e tensões residuais são menores quando comparadas a soldagem por fusão. Metais de adição, necessários a outras técnicas de soldagem, não são essenciais ao FSW, que também não torna o local de trabalho desagradável, já que não há emissão de gás, fumos, radiações e respingos (THREADGILL *et al.*, 2009).

Como o processo FSW é uma soldagem em estado sólido, problemas encontrados em métodos convencionais de soldagem por fusão não são comuns ao FSW. O processo é mecanizado, não necessita de pessoas especializadas em soldagem e não requer gás de proteção ou outro fluido, sendo fortemente recomendado para aplicações de automação e robótica (LEE; JUNG, 2005).

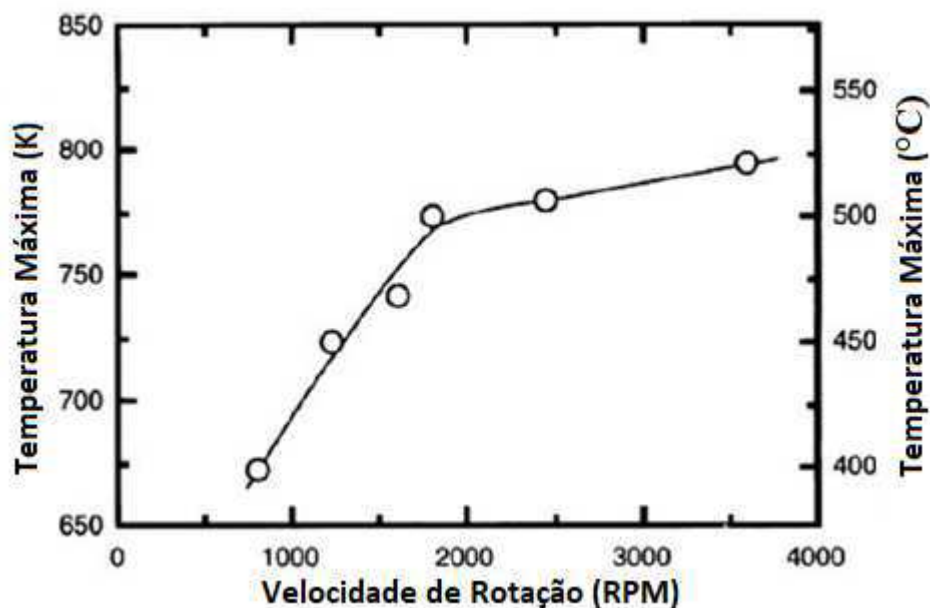
A ferramenta de soldagem utilizada na união por fricção e mistura mecânica é capaz de soldar um comprimento equivalente a 1000 metros lineares de soldagem em ligas de alumínio sem a necessidade de sua troca. Além disso, o processo FSW produz excelentes propriedades mecânicas, requer uma energia menor do que alguns outros processos de soldagem e pode utilizar estratégias mecânicas e térmicas para reduzir tensões residuais (DEBROY; BHADESHIA, 2010).

As desvantagens do FSW para soldagem de alumínio podem ser exemplificadas até mesmo com alguma vantagem citada anteriormente, porém com um ponto de vista diferente. A mecanização completa do processo pode impedir uma forma de soldagem mais complexa que poderia encaixar melhor com uma soldagem manual. Outras desvantagens são resumidas por Threadgill *et al.* (2009) como: A presença de um furo ao fim da soldagem e a necessidade de firme fixação das placas a serem soldadas.

2.2.1.2. Parâmetros de soldagem

A realização da soldagem FSW pode ocorrer tanto em uma máquina específica para o processo quanto em uma fresadora adaptada, e em ambos os casos, as variáveis são selecionadas para obter o melhor desempenho possível na soldagem. Essas variáveis são os parâmetros de soldagem, e os principais parâmetros independentes são: Velocidade de rotação; velocidade de avanço/soldagem; ângulo da ferramenta; geometria da ferramenta; deslocamento transversal ao cordão de solda (*offset*) e a pressão aplicada da ferramenta sobre a junta. A geração de calor depende diretamente destes parâmetros, aumentando significativamente com o aumento da velocidade de rotação, e diminuindo levemente com o aumento da velocidade de avanço (NANDAN *et al.*, 2008). A Figura 5 mostra os picos de temperatura com o aumento da velocidade de rotação.

Figura 5: Relação entre velocidade de rotação e picos de temperatura no processo FSW.



Fonte: Sato *et al.*, 2002.

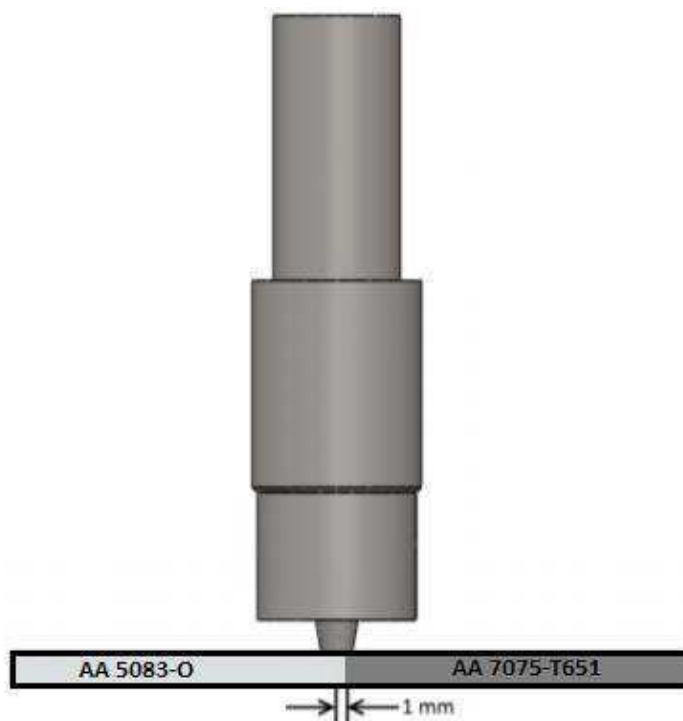
A velocidade de rotação é representada pelas rotações por minuto (RPM) da ferramenta em torno de seu próprio eixo. A rotação da ferramenta resulta na movimentação e mistura ao redor do pino, fazendo o material escoar da parte frontal da ferramenta para a parte posterior da

mesma. Além disso, Oliviecki e Beskow (2013), concluíram que velocidade de rotação é diretamente ligada à geração de calor durante a soldagem ou seja, quanto maior for a velocidade de rotação da ferramenta, maior será a temperatura atingida durante o processo como consequência do atrito da ferramenta com a peça de trabalho, confirmando a relação entre velocidade de rotação e picos de temperaturas mostrada na Figura 5.

A velocidade de avanço pode ser definida como a distância percorrida pela ferramenta através da junta a ser soldada por unidade de tempo, geralmente no padrão milímetros por segundo (mm/s). A velocidade de avanço, por sua vez, é inversamente proporcional a geração de calor durante o processo, com baixas velocidades de soldagem ocorre uma maior geração de calor e, por consequência, temperaturas mais elevadas na área de soldagem (COLAÇO, 2019).

O deslocamento transversal da ferramenta em relação ao cordão de solda é definido como *Offset* (MOROZ, 2012). A movimentação da ferramenta para o lado de materiais de maior ductilidade promove um cordão de solda com uma maior quantidade deste material, tendendo a um menor desgaste da ferramenta e uma maior ductilidade da região soldada. A Figura 6 esquematiza o parâmetro do *offset*.

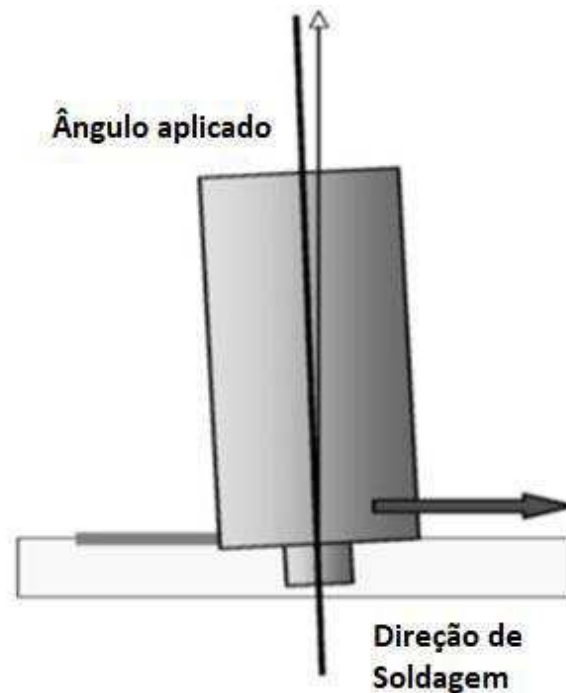
Figura 6: Esquema do *offset*.



Fonte: Autoria própria.

O ângulo da ferramenta é o quanto de inclinação a ferramenta terá ao entrar em contato com as juntas a serem soldadas, podendo ser observado no esquema da Figura 7. O ângulo de inclinação na direção da solda aumenta a movimentação de fluxo de materiais da frente para trás do pino e consolida o material plastificado (SEGATTI, 2011).

Figura 7: Esquema de inclinação da ferramenta FSW.



Fonte: Modificado de Oki *et al.*, 2007.

2.2.1.3. Defeitos oriundos do processo FSW

Os defeitos corriqueiros ao processo *Friction Stir Welding* são as falhas de superfície, cavidades e os túneis, também conhecidos como “buraco de minhoca” (NANDAN *et al.*, 2008). Os parâmetros de soldagem apresentados anteriormente são diretamente responsáveis pela ocorrência ou não desses defeitos.

A Figura 8 ilustra uma falha de superfície, o excesso de rebarba, que pode ser ocasionado pela pressão excessiva de contato entre o ombro da ferramenta e as juntas que estão sendo soldadas.

Figura 8: Defeito de superfície - excesso de rebarba.

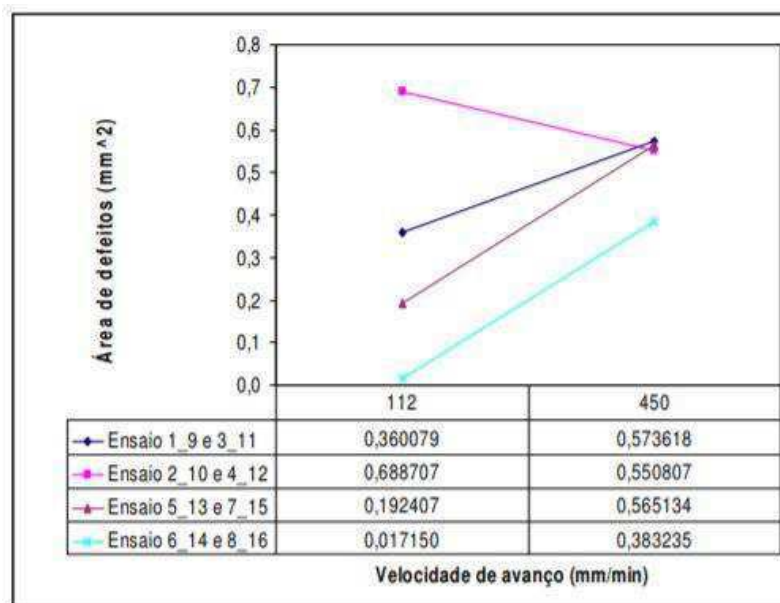


Fonte: Colaço, 2019.

Chen *et al.*, (2006) afirmou que as cavidades em juntas soldadas pelo processo FSW são geradas devido a altas velocidades de avanço, já que essas velocidades não desenvolvem uma temperatura suficiente na mistura do material deformado plasticamente, não obtendo assim um completo forjamento do material na soldagem.

As cavidades foram avaliadas por Gipiela e Martins (2015) em juntas soldadas pelo processo FSW, que concluíram sobre a tendência de ocorrência e do aumento de tamanho das cavidades com o aumento da velocidade de avanço e, de forma contrária, observaram a diminuição do tamanho das cavidades com o aumento do ângulo de inclinação. A Figura 9 confirma a conclusão desses autores, e mesmo com o evento de uma curva contrária ao padrão, acredita-se que outros fatores da soldagem, como o demasiado contato entre o ombro da ferramenta e as juntas soldadas para o experimento tenham modificado o comportamento da amostra.

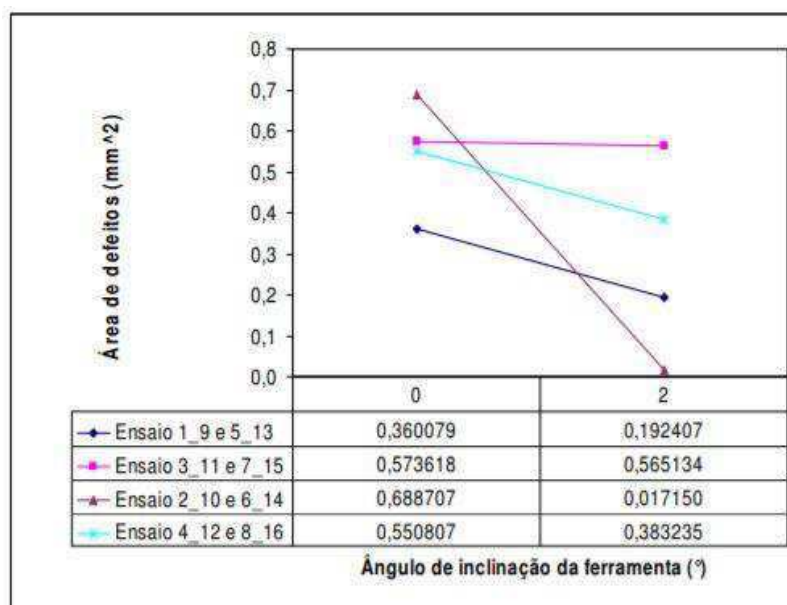
Figura 9: Área das porosidades em função da velocidade de avanço da ferramenta.



Fonte: Gipiela e Martins, 2015.

Já a Figura 10 demonstra, através de uma tendência única de comportamento das curvas sobre a influência do ângulo de inclinação nas áreas de cavidades, que o aumento do ângulo tende a diminuir as áreas de porosidades (GIPIELA; MARTINS, 2015).

Figura 10: Área das porosidades em função do ângulo de inclinação da ferramenta.



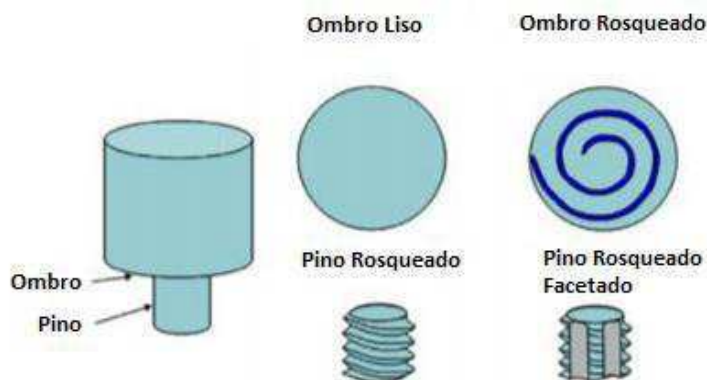
Fonte: Gipiela e Martins, 2015.

Em relação ao defeito de superfície “buraco de minhoca”, Colaço (2019) afirmou que sua formação pode ocorrer devido ao aumento na velocidade de soldagem mantendo a velocidade de rotação constante, gerando um fluxo inadequado de material ao redor da ferramenta em direção a parte inferior da solda.

2.2.1.4. Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta influencia no fluxo e na mistura do material deformado plasticamente, na geração de calor e na uniformidade da região soldada. A ferramenta é composta por um pino e um ombro, assim como mostrado na Figura 11, e tem basicamente duas funções: Prover calor e misturar o material. O contato do ombro com as juntas a serem soldadas é o maior componente para gerar calor no processo, dessa forma a geometria do ombro é um fator chave para proporcionar essa energia da melhor forma possível. O pino por sua vez, além de gerar calor, é o principal responsável pela mistura do material a ser soldado, necessitando de uma geometria que otimize essa característica. (THOMAS *et al.*, 2003).













Figura 11: Esquema de uma ferramenta FSW.



Fonte: Modificado de Mishra, 2005.

As combinações entre as mais diversas geometrias de ombro com as geometrias de pino, possibilitam a formação de uma enorme gama de ferramentas, e cada tipo de ferramenta diferente pode influenciar de uma maneira peculiar na soldagem, podendo ser na microestrutura ou na macroestrutura, de um material específico. Colaço (2019) utilizou 12 perfis de pinos com geometrias diferentes, e mantendo o perfil do ombro constante. Os perfis de cada pino podem ser observados no quadro 7.

Quadro 7: Perfis da geometria do pino da ferramenta.

Numeração	Imagem	Nome	Referência
1		Cilíndrico de ponta reta	KUMAR, (2013)
2		Rosqueado cônico de ponta arredondada	ÇAM; MISTIKOGLU, (2014);
3		Rosqueado cilíndrico facetado de ponta reta	_____
4		Rosqueado cilíndrico de ponta arredondada	CAPELARI, (2003).
5		Cilíndrico de ponta arredondada	_____
6		Rosqueado cônico de ponta reta	CAPELARI; MAZZAFERRO, (2009).
7		Cilíndrico facetado de ponta reta	CAPELARI; MAZZAFERRO, (2009).
8		Rosqueado cônico facetado de ponta arredondada	_____
9		Rosqueado cilíndrico de ponta reta	MISHRA; MAHONEY, (2007)
10		Cônico de ponta arredondada	_____
11		Cônico facetado de ponta reta	_____
12		Cônico de ponta reta	CAPELARI; MAZZAFERRO, (2009).

Fonte: Colaço, 2019.

Um segundo esquema de composição de ferramentas é ilustrado na Figura 12, por Nandan *et al.* (2008) com variações no perfil da geometria do ombro em conjunto com as variações no perfil da geometria do pino.

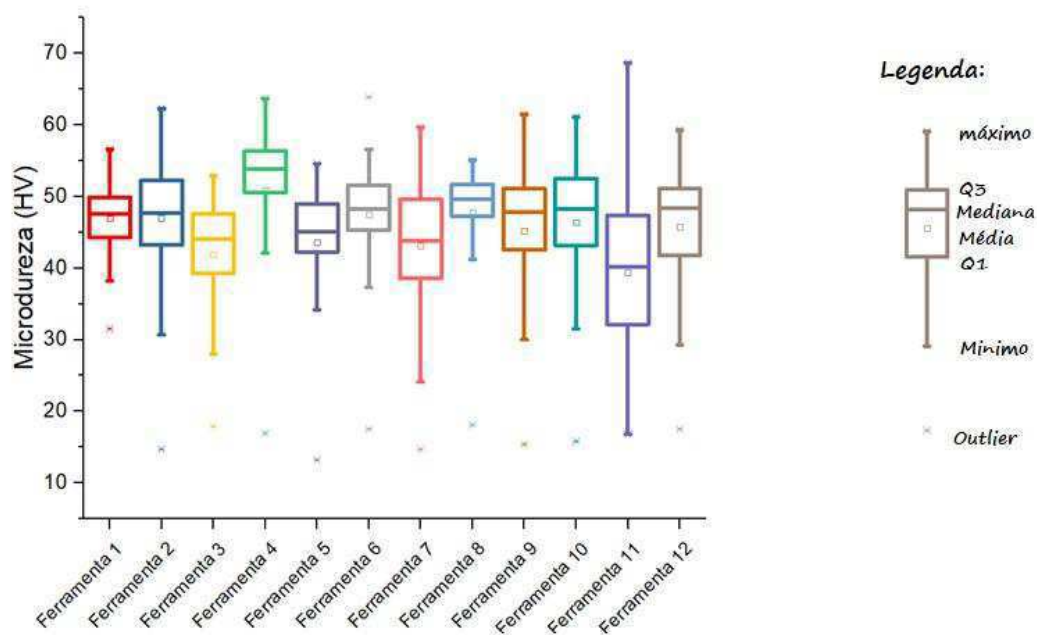
Figura 12: Esquema de diferentes ferramentas FSW.



Fonte: Nandan *et al.*, 2008.

Colaço (2019) realizou uma série de ensaios para escolher dentre as doze ferramentas do quadro 7, a melhor geometria para soldagem FSW de uma liga de alumínio da série 5000. Os ensaios mecânicos de dureza Vickers, de dobramento de raiz a 60° e de tração uniaxial estão representados pela Figura 13, quadro 8 e Figura 14, respectivamente.

Figura 13: Boxplot dos valores de dureza Vickers para as 12 ferramentas avaliadas.



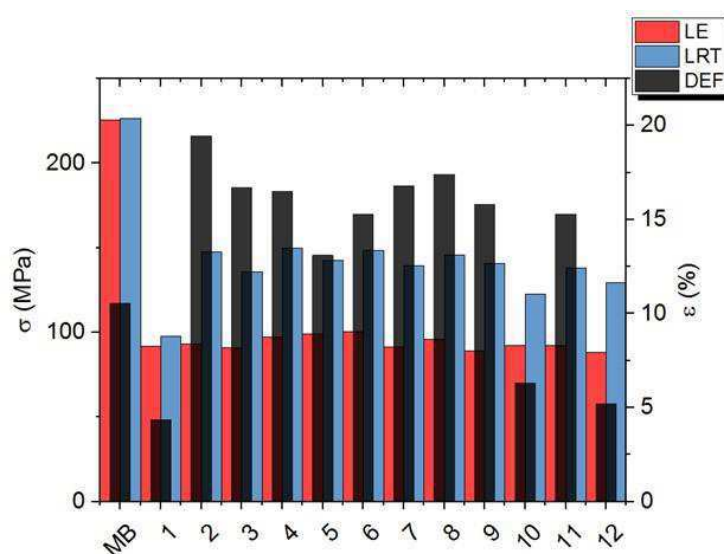
Fonte: Colaço, 2019.

Quadro 8: Carga máxima suportada no ensaio de dobramento para as juntas soldadas pelas 12 ferramentas diferentes.

	Carga Máxima Média Suportada (N)
Metal de Base	2290
Junta Soldada pela Ferramenta 1	699
Junta Soldada pela Ferramenta 2	966
Junta Soldada pela Ferramenta 3	858
Junta Soldada pela Ferramenta 4	1400
Junta Soldada pela Ferramenta 5	881
Junta Soldada pela Ferramenta 6	1002
Junta Soldada pela Ferramenta 7	1013
Junta Soldada pela Ferramenta 8	1024
Junta Soldada pela Ferramenta 9	1288
Junta Soldada pela Ferramenta 10	1036
Junta Soldada pela Ferramenta 11	836
Junta Soldada pela Ferramenta 12	724

Fonte: Colaço, 2019.

Figura 14: Principais valores obtidos no ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Colaço, 2019.

A geometria de ferramenta de número 4 (Pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada), de acordo com os dados obtidos anteriormente, obteve os maiores valores de dureza, a maior carga máxima média suportada e o maior valor de limite de resistência a tração dentre as 12 ferramentas analisadas, sendo assim a melhor escolha para soldagem de uma liga de alumínio AA 5083-O (COLAÇO, 2019).

2.3. Tensões Residuais

Cindra (2000) definiu tensões residuais como tensões existentes em um material sob condições de temperaturas uniformes e sem a ação de carregamentos externos, ou seja, se resume as tensões encontradas no material sem que ele esteja sob aplicação de forças externas. As tensões residuais têm origem na deformação elástica ou plástica não homogênea do material, o que faz surgir incompatibilidades no estado de deformação.

O estado de tensões em um corpo é auto equilibrante, com o somatório de todas as forças resultantes das tensões sendo igual a zero. Porém, quando há tensões externas agindo no material, estas são somadas as tensões residuais, podendo assim diminuir a vida útil do material (LIMA, 2013).

As tensões residuais podem ser trativas e compressivas. As trativas quando somadas as tensões externas levam ao rompimento prematuro do material. Por outro lado, as compressivas aliviam as tensões externas quando somadas a estas últimas, aumentando a vida útil do componente (COLAÇO, 2019). Assim, torna-se necessário o estudo das tensões residuais para avaliar a durabilidade da peça e para otimizar as condições do uso da mesma

2.3.1. Tensões residuais em juntas soldadas

A soldagem é um dos principais processos de fabricação que gera tensões residuais, com isso afetando o comportamento do material de sustentar as cargas aplicadas e alterando a integridade estrutural da peça. A contração durante o resfriamento da peça em diferentes regiões aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal

fonte de tensões residuais, ou seja, ocorre o impedimento de expansões e contrações devido a proximidade entre regiões aquecidas e resfriadas, gerando assim as tensões residuais.

De acordo com Melado (2014) o estado de tensões residuais presente nos componentes após a soldagem é função dos parâmetros utilizados durante a execução, podendo-se citar a geometria da junta, número de passes, corrente, velocidade e outros fatores.

Na soldagem por fusão, iniciando no estado livre de tensões da poça, tensões de tração são formadas durante o resfriamento as quais podem atingir o limite de elasticidade em função da temperatura do material. Por conseguinte, essas tensões continuam no cordão da solda após o final do procedimento. As regiões que estão adjacentes ou mais afastadas do cordão de solda e que não foram fundidas durante o processo de soldagem também sofrem deformações térmicas, mesmo que limitadas, durante o período de resfriamento, gerando assim tensões residuais internas (RUANO, 2017).

O cenário na soldagem FSW proporciona um estado de tensões residuais menor que soldagens convencionais por fusão, mas ainda assim, este cenário interfere diretamente na propagação de trincas. A soldagem pelo processo FSW possui uma característica que a difere das soldagens convencionais por fusão no que tange as tensões residuais: a tensão adicional causada pelos componentes de rotação e translação da ferramenta, de forma que os parâmetros de soldagem afetam o estado final de tensões (CHEN; KOVACEVIC, 2006). A plasticidade durante o processo de fricção também é um importante fator que é considerado durante os cálculos das tensões residuais.

Segundo Ruano (2017), a distribuição das tensões residuais depende também do material soldado e não apenas do processo de soldagem. Embora os princípios gerais da formação de tensões residuais permaneçam os mesmos para o alumínio, existem diferenças leves devido ao fato de que as propriedades dos materiais das ligas de alumínio são significativamente diferentes das do aço e outros materiais. Por exemplo, o aumento da temperatura de fusão aumenta a tensão residual e a distorção, considerando só essa influência, o alumínio seria mais adequado para a soldagem que o aço, baseando-se em uma geração de estado de tensões residuais menor.

2.4. Planejamento Experimental

Uma das implicações do desenvolvimento da pesquisa científica, incluindo automação na geração e aquisição de dados, foi a obtenção de uma grande quantidade de dados e variáveis. Conseqüentemente, a aplicação de ferramentas estatísticas para lidar com as grandes quantidades de dados, torna-se indispensável (COSTA *et al.*, 2006).

Barros Neto *et al.* (1995), relata que a análise estatística de dados é apenas uma das opções de uso da estatística, e que esta possui o planejamento de experimentos como uma atividade de grande importância. Este planejamento evita um aglomerado de dados do qual não é possível extrair conclusões.

Perante o publicado e levando em consideração a necessidade de economia em relação aos recursos financeiros e laboratoriais que levam às restrições de verbas para a aquisição de equipamentos e materiais de consumo, deve-se ponderar no início de cada pesquisa científica sobre a definição das condições experimentais, que permitam a aquisição de resultados confiáveis, já que a otimização de parâmetros experimentais de relevância é considerada como uma das fases mais críticas da pesquisa científica, principalmente daqueles que têm por objetivo o desenvolvimento de processos tecnológicos aplicáveis em grande escala (PERALTA-ZAMORA *et al.*, 2005).

Dessa forma o planejamento experimental pode ser descrito como uma ferramenta efetiva no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização. A realização de um planejamento apropriado permite a redução de tempos de análises e dos custos envolvidos (BUTTON, 2005). Porém, sua essência está no projeto do planejamento, para que este consiga fornecer as informações procuradas e dependendo do que o experimentador queira, algumas técnicas são mais vantajosas que outras. Todavia, o planejamento não substitui o conhecimento técnico e experiência de um especialista da área que se está pesquisando, tanto a ferramenta quando os conhecimentos dos especialistas devem trabalhar em conjunto para resultar em bons planejamentos de experimentos (MARINHO; CASTRO, 2005).

Cunico *et al.* (2008) conceitua alguns dos principais termos necessários para o entendimento do planejamento experimental, como:

- **Nível:** São as condições de operação dos fatores de controle investigados,

geralmente identificados por baixo (-) e alto (+). Um planejamento 2^3 possui dois níveis, por exemplo;

- Fator: São as variáveis que serão estudadas na pesquisa. Em um planejamento 2^3 estariam sendo três fatores;
- Efeito: É a mudança que a resposta sofre ao se mudar de nível. Calculada pela subtração entre a média dos valores da resposta obtidos no nível alto do fator e a média dos valores da resposta no nível baixo;

Assim, se no desenvolvimento de um planejamento forem definidos 2 níveis para 3 fatores, este planejamento será um 2^3 e, como resultado desse exponencial, 8 condições experimentais diferentes deverão ser realizadas para satisfazer o planejamento de forma completa. Números de experimentos e número de condições experimentais são conceitos diferentes, pois um número de réplicas pode ser adicionado ao número de condições experimentais para assim resultar no número de experimentos. Consequentemente, os ensaios devem ser realizados de forma aleatória, visando evitar distorções estatísticas comprometedoras da qualidade dos resultados obtidos e dos efeitos calculados para as variáveis estudadas (GALDÁMEZ, 2002).

Button (2005) pontuou, dentre as diversas vantagens do planejamento experimental, as seguintes:

- Reduzir o número de experimentos ou repetições e melhorar a qualidade da informação obtida através dos resultados, reduzindo o trabalho, custo e tempo;
- Estudar simultaneamente várias variáveis, verificando e quantificando seus efeitos;
- Otimização de mais de uma resposta ao mesmo tempo;
- Calcular e avaliar o erro experimental, sendo fundamental para que se possa explicitar o nível de confiança estatística com o qual pode-se estimar a reprodutibilidade do resultado desejado;
- Elaborar conclusões através de resultados qualitativos.

Marinho e Castro (2005) concluíram que mesmo utilizando um número reduzido de

experimentos por fator, o planejamento pode indicar tendências e direções para o estudo, além de poder aumentar os experimentos quando uma exploração maior for necessária, através da metodologia de superfícies de resposta.

O planejamento experimental determina quais fatores têm efeitos relevantes na resposta e como o efeito de um fator modifica-se através dos níveis dos outros fatores. Perante o publicado, nota-se que sem a utilização de planejamentos fatoriais de experimentos, importantes interações entre fatores podem não ser detectadas e a otimização máxima do sistema pode levar mais tempo para ser obtida (CUNICO *et al.*, 2008).

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

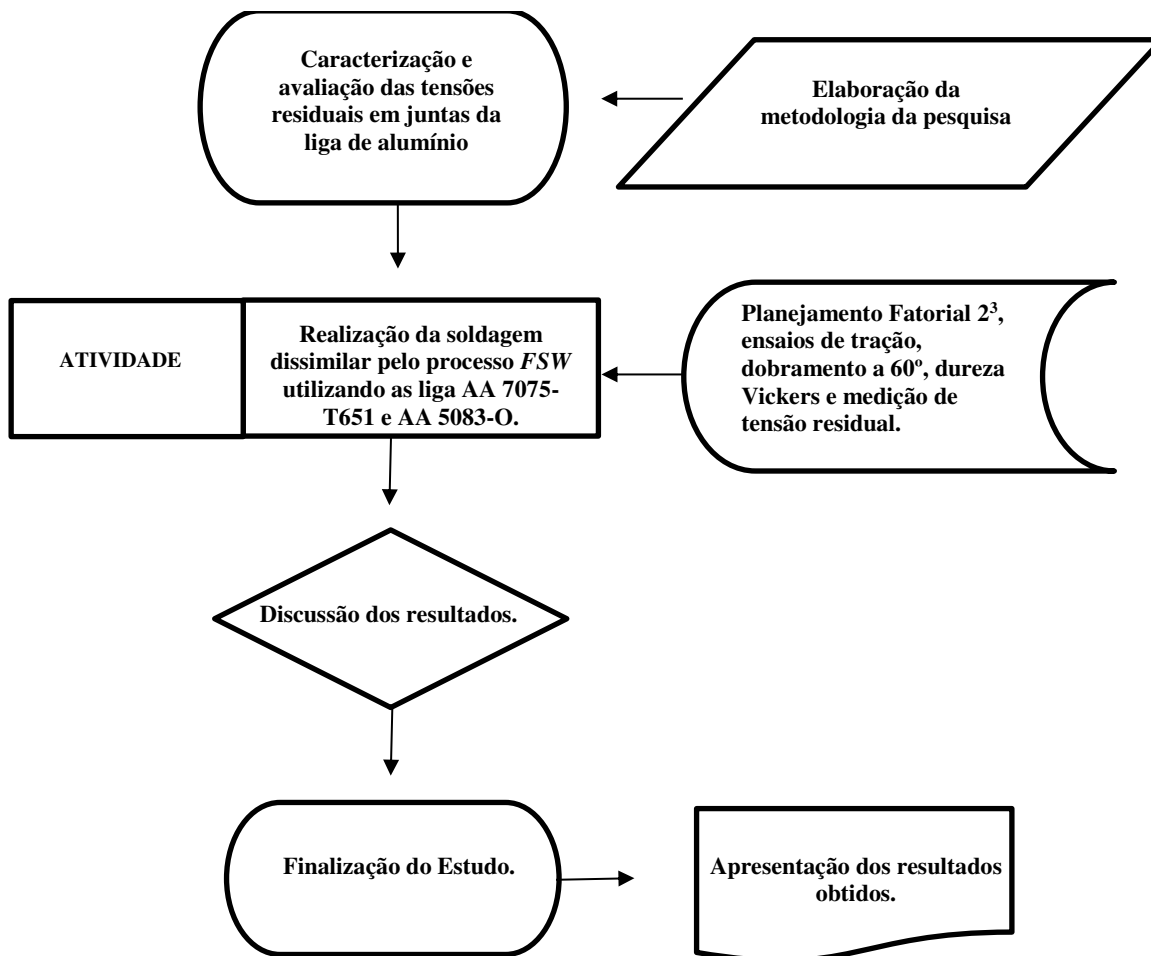
Neste capítulo será abordado os materiais utilizados na pesquisa, bem como a metodologia aplicada para alcançar os objetivos propostos. O capítulo divide-se em caracterização da pesquisa, onde será explanado a área em que o trabalho se insere, com um fluxograma detalhando os passos utilizados; materiais, informando as diferentes ligas de alumínio utilizadas, suas composições químicas e principais propriedades; processo de soldagem, expondo os parâmetros das soldagens utilizadas nos processo FSW e, por fim, a metodologia de ensaios empregados no presente estudo.

3.1. Desenvolvimento da pesquisa

A atual pesquisa é interdisciplinar no âmbito da engenharia mecânica e de característica teórico – experimental, ou seja, dedicada a construir e/ou reconstruir teorias, visualizando aprimorar fundamentos teóricos. Foram determinados os objetivos de estudo, como determinação das tensões residuais, das propriedades mecânicas das juntas soldadas pelo processo FSW, e os parâmetros capazes de influenciar tais objetivos, bem como, as formas de controle e observações dos efeitos que os parâmetros produziram nesses objetivos.

De acordo com a Figura 15, foram conduzidas as soldagens de ligas de alumínio dissimilares pelo processo FSW nas chapas da liga AA 7075-T651 e na liga AA 5083-O. Para tanto, foi utilizado o planejamento experimental fatorial, com objetivo de analisar os parâmetros de soldagens e determinar a influência dos parâmetros de processo na qualidade da junta soldada. Ensaios mecânicos foram efetuados, além de perfis e magnitude de tensões residuais superficiais para caracterizar as juntas soldadas.

Figura 15: Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.



Fonte: autoria própria.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram as ligas de alumínio da série 5000 – que contém o magnésio como principal elemento ligante – e ligas de alumínio da série 7000 – com o zinco como principal elemento de adição – para realização da soldagem dissimilar entre elas. A liga da série 7000 escolhida foi a AA 7075-T651, sendo esta utilizada no lado de recuo da soldagem dissimilar, já a liga da série 5000 escolhida foi a AA 5083-O, utilizada no lado de avanço da soldagem dissimilar, conforme a Figura 16 apresenta.

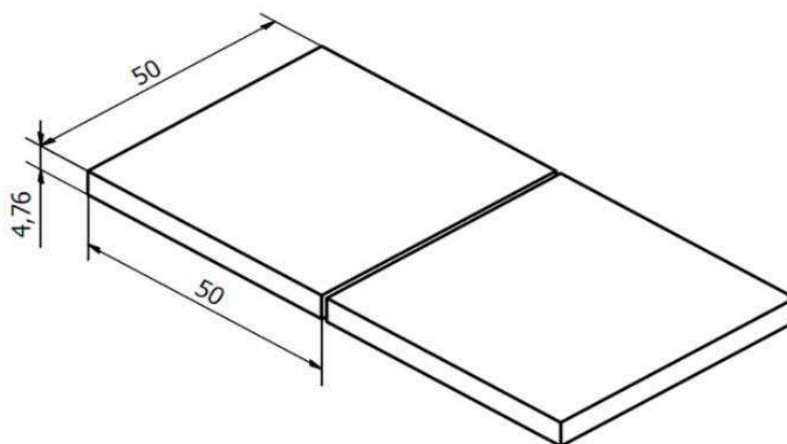
Figura 16: Junta de alumínio com a liga AA 5083-O no lado de avanço (A) e a liga AA 7075-T651 no lado de recuo (R).



Fonte: autoria própria.

Inicialmente as chapas de alumínio AA 5083-O e AA 7075-T651 foram usinadas nas dimensões de 50x50x4,75 mm, como pode ser observado na Figura 17, logo abaixo. Já os Quadros 9 e 10 ilustram as composições químicas nominais das ligas AA 7075-T651 e AA 5083-O, respectivamente.

Figura 17: Esquema das juntas de alumínio utilizadas na soldagem e suas dimensões em milímetros.



Fonte: autoria própria.

Quadro 9: Composição química nominal da liga de alumínio AA 7075-T651.

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
2,1 - 2,9	0,4	0,5	1,2 - 2,0	0,3	0,28	5,1 - 6,1	0,2	0,15	Balanço

Fonte: ASTM B209, (2014).

Quadro 10: Composição química nominal da liga de alumínio AA 5083-O.

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
4,9	0,4	0,4	0,1	1,0	0,25	0,25	0,15	0,15	Balanço

Fonte: ASTM B209, (2014).

3.3. Processos de soldagem

3.3.1. Definição dos equipamentos da soldagem

A geometria de ferramenta escolhida foi a com pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada, ilustrada na Figura 18. Essa escolha foi feita tendo em vista os melhores resultados obtidos com a mesma pela autora Colaço (2019) em juntas soldadas de ligas de alumínio em termos de limite de resistência à tração mecânica, dentre várias outras geometrias de ferramentas analisadas pelos mesmos.

Figura 18: Ferramenta de Soldagem de pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada.



Fonte: autoria própria.

A ferramenta foi usinada em aço ao carbono ABNT 1020, submetida a cementação em caixa, a 925 °C por 4 horas, seguida de têmpera em água agitada, a fim de aumentar a dureza e resistência ao desgaste do pino e ombro da ferramenta.

A ferramenta foi conectada a uma fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat, conforme ilustra a Figura 19, localizada no laboratório de máquinas operatrizes, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), no campus de Cajazeiras.

Figura 19: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat com a ferramenta de pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada conectado.



Fonte: autoria própria.

3.3.2. Definição dos parâmetros da soldagem

Os parâmetros de soldagem variados foram a velocidade de avanço, velocidade de rotação e *offset*, utilizando um planejamento experimental 2^3 com 3 pontos centrais, que são utilizados para evitar as repetições e assim um alto número de experimentos, para a determinação, otimização e quantificação da influência das variáveis sobre as respostas desejadas, obtendo-se assim respostas confiáveis. Foram estabelecidos como parâmetros fixos o ângulo de inclinação

da ferramenta de 3°, a liga AA 5083-O no lado de avanço e a liga AA 7075-T651 no lado de recuo.

O quadro 11 demonstra os níveis definidos através da literatura para os fatores em estudo, e o quadro 12 ilustra os parâmetros das onze juntas soldadas através do planejamento 2^3 com 3 pontos centrais da soldagem dissimilar pelo processo FSW.

Quadro 11: Níveis dos fatores em estudo.

Parâmetros	Nível -1	Ponto central 0	Nível +1
Velocidade de avanço (mm/min)	40	110	180
Velocidade de rotação (RPM)	350	610	870
Offset (mm)	0	0,5	1

Fonte: autoria própria.

Quadro 12: Parâmetros do planejamento 2^3 com 3 pontos centrais da soldagem dissimilar pelo processo FSW.

Junta soldada	Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade de rotação (RPM)	Offset (mm)
1	40	350	0
2	180	350	0
3	40	870	0
4	180	870	0
5	40	350	1
6	180	350	1
7	40	870	1
8	180	870	1
9	110	610	0,5
10	110	610	0,5
11	110	610	0,5

Fonte: autoria própria.

3.4. Metodologia dos ensaios

3.4.1. Ensaio mecânico de tração uniaxial

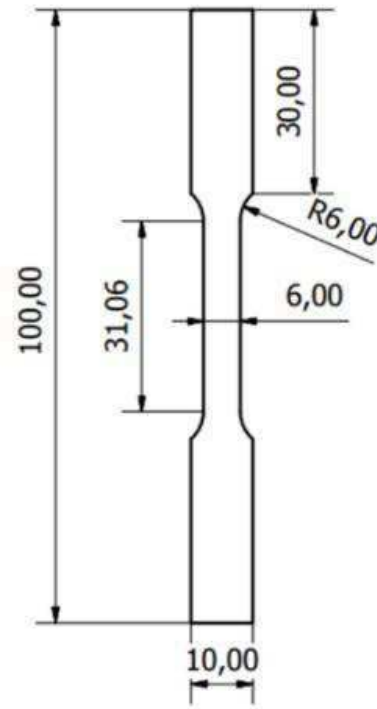
Foram realizados ensaios de tração uniaxial para cada uma das juntas dissimilares soldadas através dos diferentes parâmetros. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios MTS, modelo 810, adaptada para a tração e localizada no Laboratório de ensaios da unidade acadêmica de engenharia mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), podendo ser observado na Figura 20. Para os ensaios foi adotado uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ruptura dos corpos de prova. A Figura 21 ilustra o corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

Figura 20: Máquina universal de ensaios MTS, modelo 810, adaptada para tração uniaxial.



Fonte: autoria própria.

Figura 21: Corpo de prova do ensaio de tração.

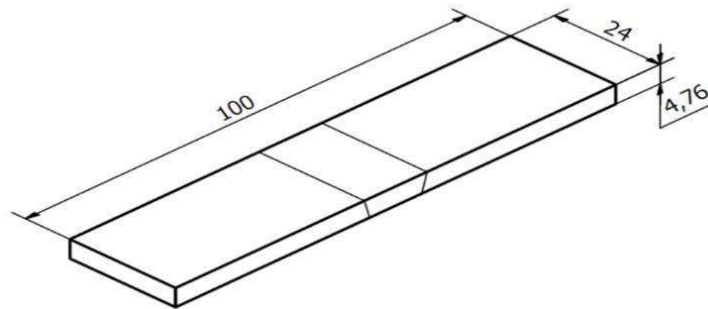


Fonte: autoria própria.

3.4.2. Ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60°

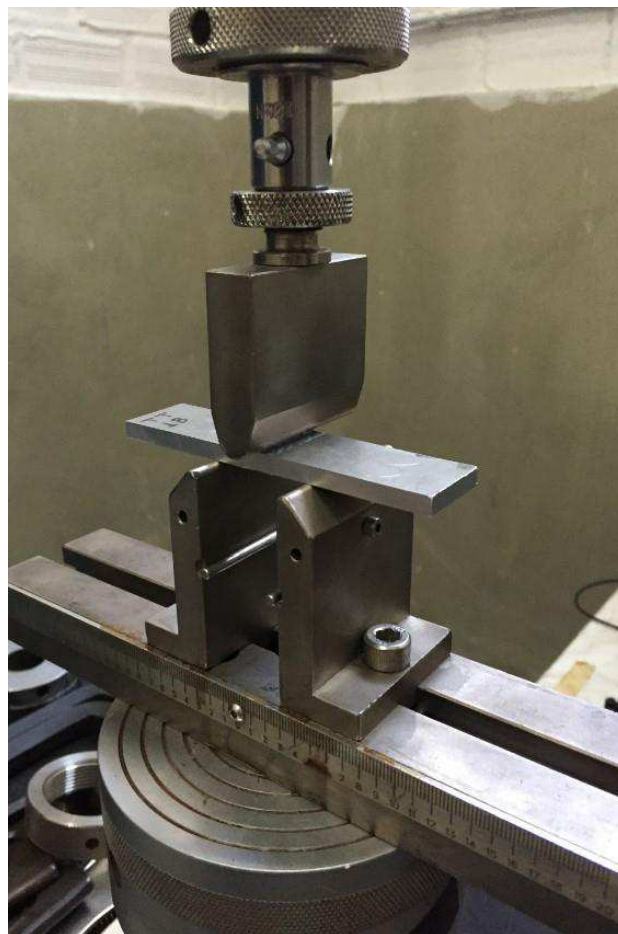
O ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60° foi realizado com a finalidade de averiguação qualitativa da soldagem, com um corpo de prova nas dimensões ilustradas na Figura 22. Para cada junta soldada foi efetivado dois ensaios de dobramento, sendo realizado na máquina de ensaio universal MTS, modelo 810, adaptada para o dobramento e ilustrado na Figura 23, existente no laboratório de ensaios da UAEM da UFCG, seguindo a norma ASTM E190-92, adotando uma taxa de deslocamento de 10mm/min.

Figura 22: Corpo de prova do ensaio de dobramento de raiz a 60°.



Fonte: autoria própria.

Figura 23: Máquina de ensaio universal MTS, modelo 810, adaptada para dobramento de raiz a 60°.

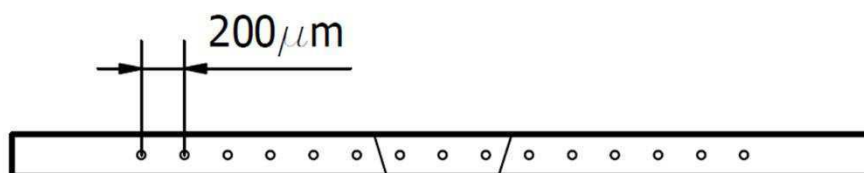


Fonte: autoria própria.

3.4.3. Ensaio mecânico de dureza Vickers

Foram realizados ensaios de dureza Vickers ao longo de toda junta aplicando-se uma carga de 50 gramasforça (gf), por 15 segundos, com espaçamento entre as impressões de 200 μm , passando desde o metal de base até as zonas afetadas pela soldagem, ao longo de uma linha horizontal transversal ao cordão de solda, conforme ilustra a Figura 24, utilizando um microdurômetro digital FM-700 da FutureTech que pode ser observado na Figura 25.

Figura 24: Esquema do ensaio de dureza Vickers.



Fonte: autoria própria.

Figura 25: Microdurômetro digital FM-700 da FutureTech.



Fonte: autoria própria.

3.4.4. Medições das tensões residuais

Para as medições das tensões residuais foi aplicada uma variação da técnica semi-destrutiva do furo cego. O método consiste na realização de pequenos furos nas juntas soldadas e na utilização de uma máquina de medição de coordenadas para determinar a variação das coordenadas pré-determinadas para o centro de um furo, já que a variação é esperada devido ao relaxamento das tensões residuais presentes. Para isso, são utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2)$$

Onde:

σ_x é a magnitude da tensão residual longitudinal;

σ_y é a magnitude da tensão residual transversal;

E é o módulo de elasticidade;

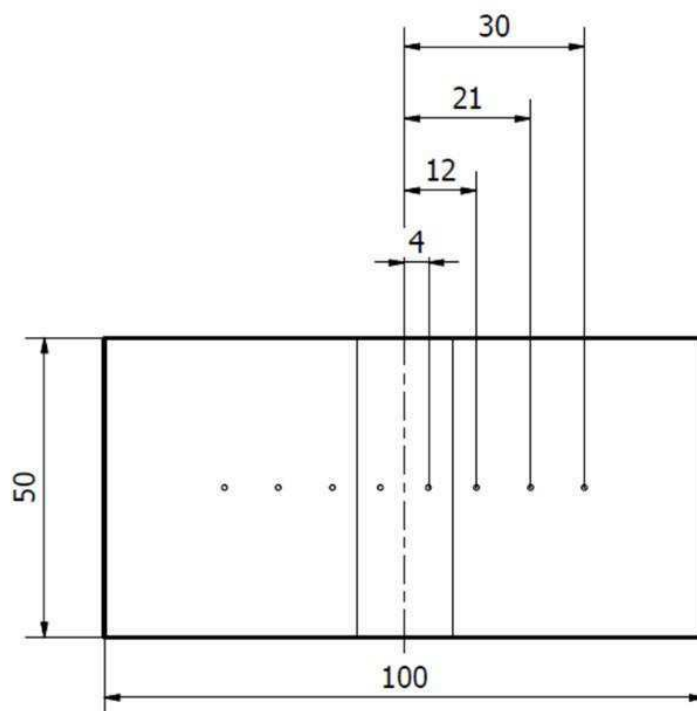
ν é o coeficiente de Poisson;

ε_x é a deformação característica na direção longitudinal;

ε_y é a deformação característica na direção transversal;

As coordenadas de referência foram verificadas em um programa CNC, em código FANUC, e os furos foram efetivados utilizando-se um centro de usinagem D-600 da Romi. O esquema da furação é apresentado na Figura 26. As coordenadas após a realização da furação foram determinadas utilizando uma Máquina de Medição de Coordenadas modelo TESAMICROHITE 3D, com resolução de 0,1 μm .

Figura 26: Ilustração das distâncias em milímetros entre os furos para medição das tensões residuais.



Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos. O texto seguinte tratará sequencialmente dos seguintes tópicos: Planejamento Experimental, inspeção visual, os resultados preliminares dos ensaios de tração, perfil de dureza, perfis de tensões residuais e o ensaio de dobramento de raiz a 60°. Todos os ensaios realizados das juntas de alumínio 5083-O e 7075-T651 soldadas por FSW.

4.1. Planejamento Experimental

A determinação da influência dos parâmetros de soldagem (velocidade de rotação, velocidade de avanço e *offset*) para se obter uma soldagem pelo processo FSW de forma otimizada, foi realizada empregando-se planejamento fatorial 2³ com 3 pontos centrais. Este estudo incluiu metodologia de análise estatística dos resultados e análise da variância (ANOVA), com os ensaios de tração e dobramento. As respostas incluídas no planejamento foram o limite de resistência à tração, a deformação sob tração e a carga máxima de dobramento e podem ser visualizadas no quadro 13.

Quadro 13: Matriz de planejamento com resultados.

Experimento	VA (mm/min)	VR (RPM)	Offset (mm)	LRT (MPa)	Carga máxima (N)	Deformação (%)
1	40	350	0	280,58	2099,35	18,61
2	180	350	0	295,07	3012,05	18,97
3	40	870	0	281,14	2305,77	20,75
4	180	870	0	270,80	1870,22	15,54
5	40	350	1	174,61	2421,08	7,31
6	180	350	1	92,69	2799,53	4,27
7	40	870	1	246,48	2208,22	17,08
8	180	870	1	162,19	1766,99	6,80
9	110	610	0,5	254,43	2090,79	18,14
10	110	610	0,5	224,92	1863,08	11,97
11	110	610	0,5	276,88	2342,95	21,93

Fonte: autoria própria.

É possível notar a grande diferença de valores do limite de resistência a tração devido aos parâmetros utilizados em cada experimento, com um valor mínimo de 92,69 MPa para o experimento 6 e um máximo de 295,07 MPa para o experimento 2. É importante mencionar que esses experimentos se diferenciam em parâmetros apenas pelo *offset*, sendo esse 0 mm no experimento 2 e 1 mm no experimento 6.

Com relação a carga máxima de dobramento, o menor valor foi obtido pelo experimento 8, com 1766,99 N e o maior valor foi obtido pelo experimento 2, com 3012,05 N. Os parâmetros de 180 mm/min, 350 RPM e 0 mm de *offset*, que compõem o experimento 2, mais uma vez foi responsável pelo maior valor do ensaio.

A deformação sob tração, obteve um menor valor de deformação no experimento 6 com 4,27%, já o maior valor adquirido foi no experimento 11 com 21,93%. O experimento 2 que resultou nos maiores valores de limite de resistência a tração e de carga máxima de dobramento, obteve 18,97% de deformação, um valor relativamente próximo do experimento 11.

Para verificação dos resultados foi utilizado o *software Statistica* da *Statsoft* com nível de confiabilidade estatística dos resultados de 95% para obtenção de P, que está relacionado ao nível de significância das variáveis analisadas em um modelo de regressão. No quadro 14 estão descritos os valores de P para os parâmetros de velocidade de avanço (VA), velocidade de rotação (VR) e *offset* (OS), além das interações entre eles.

Quadro 14: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 95%.

FATORES	VALOR DE P PARA TODOS OS EFEITOS		
	LRT (MPa)	CM (N)	DEF (%)
MÉDIA	0,000144	0,002538	0,000099
VA	0,162866	0,302083	0,620577
VR	0,273662	0,505976	0,062757
OS	0,014340	0,078451	0,910934
VA*VR	0,777537	0,445280	0,063638
VA*OS	0,148386	0,602876	0,525290
VR*OS	0,157415	0,421028	0,708333
VA*VR*OS	0,815097	0,916245	0,533420
R²	0,92844	0,78575	0,8582
R² AJUSTADO	0,76146	0,28582	0,52732
MS RESIDUAL	968,557	26,699954	70933,04

Fonte: autoria própria.

Em destaque no quadro 14 encontram-se os valores estatisticamente significativos, ou seja, que possuem valores menores ou iguais a 0,05. Dessa forma, com a confiabilidade de 95% apenas o *offset* para o limite de resistência a tração pode ser considerado estatisticamente significativo.

Entretanto, alguns efeitos que não foram considerados estatisticamente significativos pelo software não podem ser simplesmente ignorados, principalmente por dois fatores: Primeiro por apresentarem valores próximos aos estatisticamente significativos, e segundo por conservarem influências físicas sobre o fenômeno da soldagem FSW. Assim, o bom senso na interpretação dos dados e do processo deve ser utilizado na seleção de variáveis e do modelo (MELO et al., 2012). Dessa forma, um valor de confiabilidade de 90% é totalmente aceitável para um processo da complexidade do *Friction Stir Welding*, sendo esse ilustrado no quadro 15.

Quadro 15: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 90%.

FATORES	VALOR DE P PARA TODOS OS EFEITOS		
	LRT (MPa)	CM (N)	DEF (%)
MÉDIA	0,000144	0,002538	0,000099
VA	0,162866	0,302083	0,620577
VR	0,273662	0,505976	0,062757
OS	0,014340	0,078451	0,910934
VA*VR	0,777537	0,445280	0,063638
VA*OS	0,148386	0,602876	0,525290
VR*OS	0,157415	0,421028	0,708333
VA*VR*OS	0,815097	0,916245	0,533420
R²	0,92844	0,78575	0,8582
R² AJUSTADO	0,76146	0,28582	0,52732
MS RESIDUAL	968,557	26,699954	70933,04

Fonte: autoria própria.

No novo modelo de confiabilidade em 90%, além do *offset* para o limite de resistência a tração que já era estatisticamente significativo para 95%, o *offset* para a carga máxima de dobramento, a velocidade de rotação para deformação sob tração e a interação entre velocidade de avanço e velocidade de rotação para a deformação sob tração surgem como fatores estatisticamente significativos.

Nos quadros 16 a 18 estão os resultados das análises de variância para cada resposta do modelo aplicado, além do teste F que mede a capacidade de predição de uma resposta através

de um modelo matemático a partir de sua regressão em nível de significância dado em função do intervalo de confiança da ANOVA (PAIVA *et al.*, 2018).

Quadro 16: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Limite de resistência a tração.

FONTES DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	33924,14	1	33924,14	45,7	3,36
RESÍDUO	6679,8	9	742,2		
FALTA DE AJUSTE	1547,06	7	221,01		
ERRO PURO	1358,62	2	679,11		
TOTAL	40603,94	10	$R^2 = 0,92$		

Fonte: autoria própria

Quadro 17: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Deformação.

FONTES DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	209,85	1	209,85	10,23	3,36
RESÍDUO	184,5	9	20,5		
FALTA DE AJUSTE	29,55	7	4,22		
ERRO PURO	50,54	2	25,27		
TOTAL	373,85	10	$R^2 = 0,79$		

Fonte: autoria própria.

Quadro 18: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de Carga Máxima.

FONTES DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	1005222,2	2	50111,1	8,16	3,11
RESÍDUO	495444,8	8	61930,6		
FALTA DE AJUSTE	97562	6	23644,39		
ERRO PURO	115237	2	35466,5		
TOTAL	1500667	10	$R^2 = 0,86$		

Fonte: autoria própria.

Para ser significativo estatisticamente, ou bem ajustado, o valor de F obtido da regressão (F calculado) deve ser maior que o F tabelado (LUCENA, 2008). Em contrapartida, para que o modelo seja não apenas estatisticamente significativo, mas também útil para fins preditivos, o F calculado deve ser pelo menos quatro vezes maior que o F tabelado.

Tomando como base o exposto na literatura e analisando os resultados obtidos nos quadros 16 a 18, é possível afirmar que os modelos são estatisticamente significativos para as três respostas (limite de resistência a tração, carga máxima, deformação), porém as respostas de deformação e carga máxima não são preditivas. Podendo-se confirmar as afirmações pelo valor de R^2 .

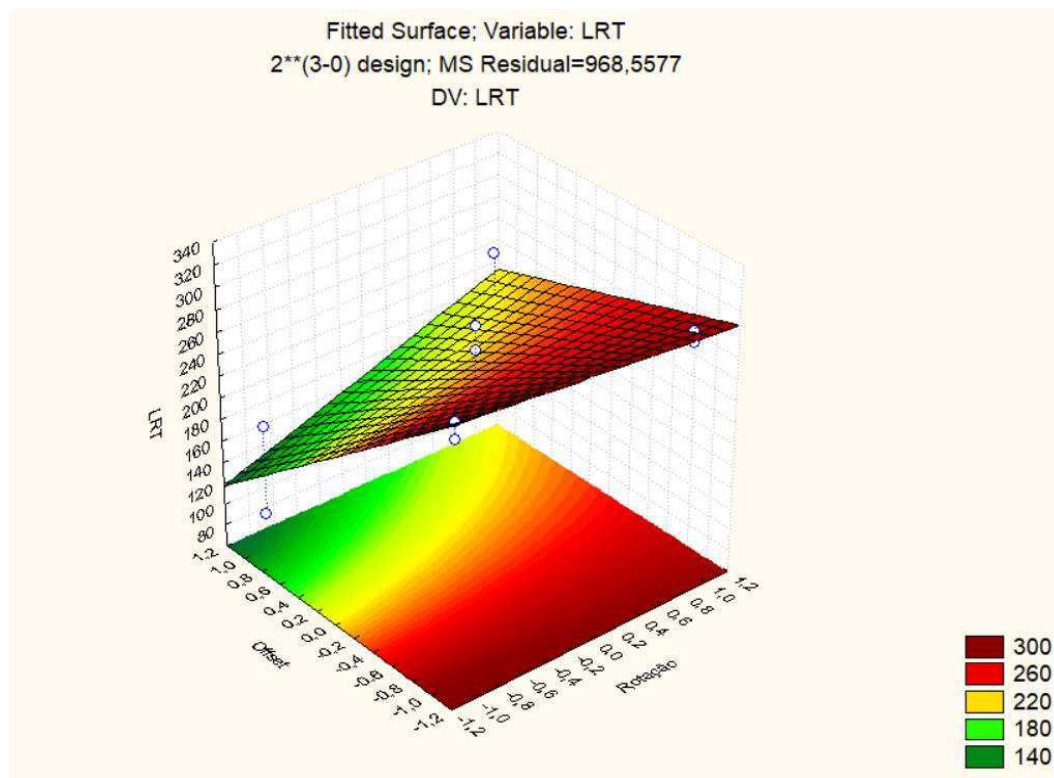
Ademais, é importante ressaltar que a impossibilidade de medição da força de contato entre o ombro da ferramenta e as juntas a serem soldadas pode ter influenciado para que certos parâmetros como a velocidade de avanço, a velocidade de rotação e suas interações não tenham obtido resultados como respostas significativas e preditivas.

4.1.1. Influência dos parâmetros de soldagem sobre o limite de resistência a tração

Sendo o modelo da resposta de limite de resistência a tração considerado estatisticamente significativo, foi elaborado um gráfico de superfície, conforme ilustra a Figura 27, sobre os comportamentos das variáveis de repostas afetadas pelos fatores de controle. É possível observar que quanto menor o *offset*, ou seja, quanto mais centralizada está a ferramenta entre as placas a serem soldadas, maior será sua influência no aumento do limite de resistência à tração.

De acordo com a metodologia de soldagem, a liga de alumínio de maior ductilidade se encontra no lado de avanço, ou seja, a maior parte desse material constituirá a junta soldada. Como a resistência na junta soldada pode ser considerada uma junção dos diferentes materiais, então a junta vai obter menor limite de resistência a tração à medida que a ferramenta se localizar mais para o lado de avanço, com um maior *offset*, diminuindo assim a mistura entre os diferentes materiais.

Figura 27: Influência do *offset* e da rotação sobre o limite de resistência a tração.



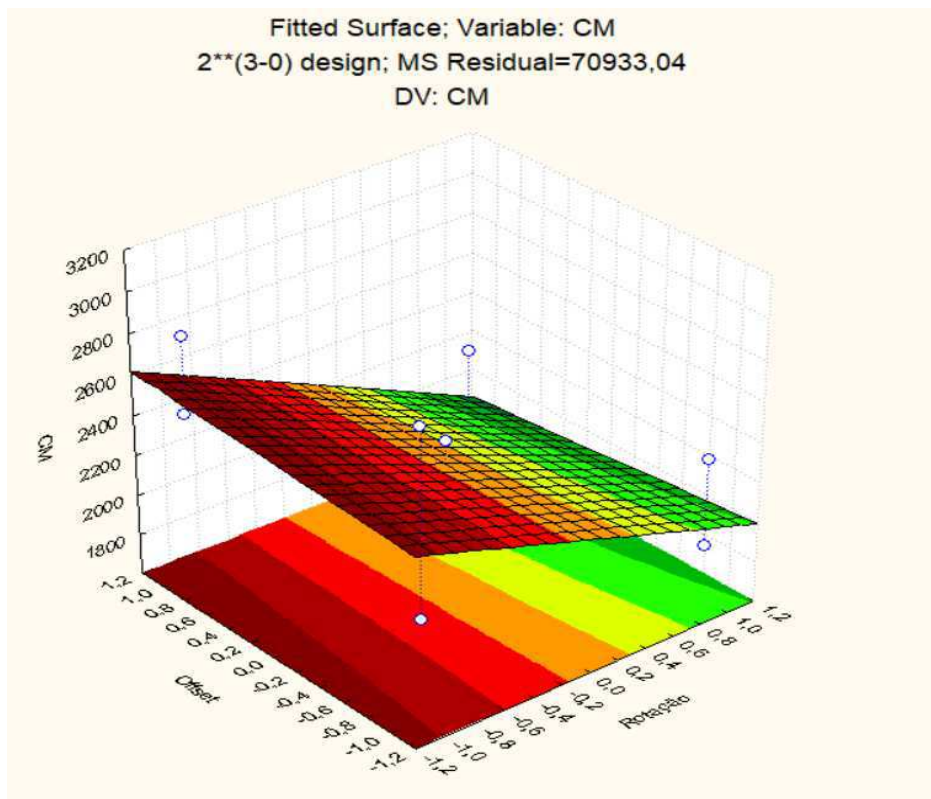
Fonte: autoria própria.

4.1.2. Influência dos parâmetros de soldagem sobre a carga máxima

Foi observado no Quadro da ANOVA que o modelo da resposta de carga máxima foi considerado estatisticamente significativo. Através dessa informação, foi elaborado o gráfico da influência dos parâmetros de *offset* e velocidade de rotação sobre a resposta, como pode ser visualizado na Figura 28. Ao analisar a Figura 28, ficou evidente que ao diminuir a velocidade de rotação da ferramenta, há um aumento da carga máxima.

Ao reduzir a velocidade de rotação da ferramenta, o aporte de calor na região soldada aumenta devido ao atrito mais concentrado, podendo assim favorecer a precipitação de intermetálicos que aumentam a resistência do material soldado, conseqüentemente aumentando a carga máxima suportada em um ensaio de dobramento. Pode ser observado que o *offset* não influenciou para o aumento da carga máxima suportada.

Figura 28: Influência do *offset* e da rotação sobre a carga máxima.



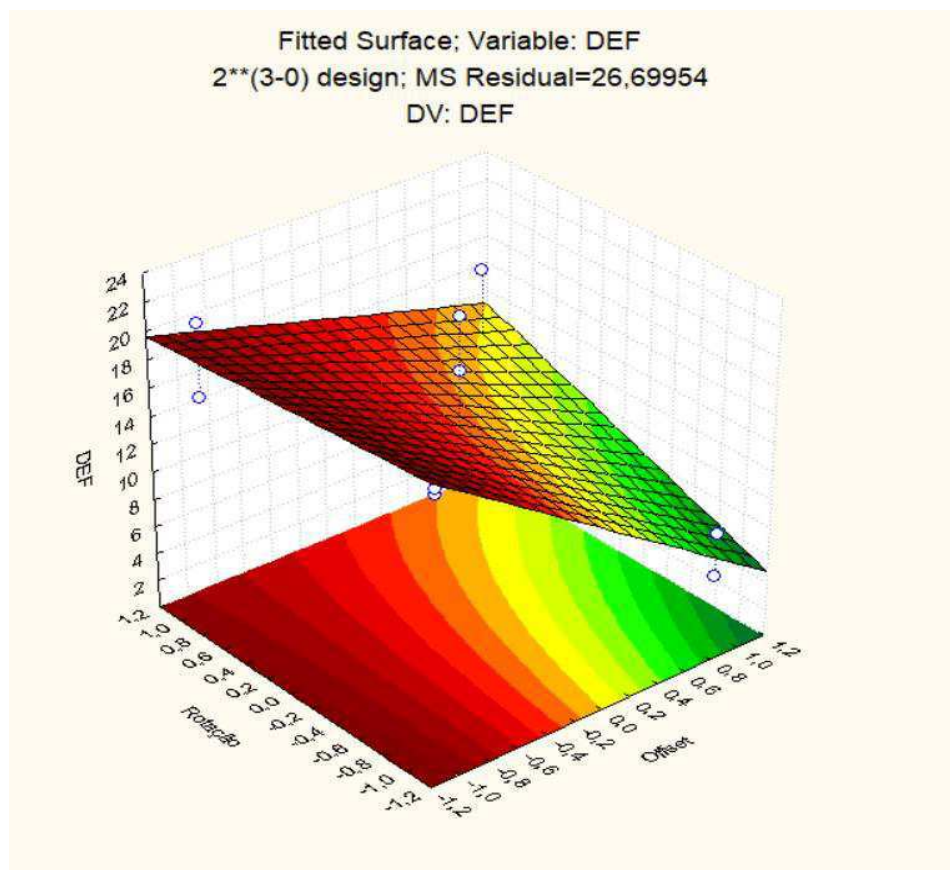
Fonte: autoria própria.

4.1.3. Influência dos parâmetros de soldagem sobre a deformação

Sendo o modelo da resposta de deformação máxima obtida no ensaio de tração considerado estatisticamente significativo, foi elaborado um gráfico, conforme ilustra a Figura 29, sobre os comportamentos das variáveis de repostas afetadas pelos fatores de controle. Ao analisar a Figura 29 observou-se que ao diminuir o *offset*, há um aumento na deformação.

Ao aumentar o *offset*, a ferramenta se localiza mais para o lado de avanço da solda, onde está posicionada a liga AA 5083, considerado um material de ductilidade maior do que a liga AA 7075. Durante a realização da solda, maior volume do material do lado de avanço é fornecido para o centro da solda, ou seja, maior quantidade da liga AA 5083 compõe a junta soldada, aumentando assim a capacidade do material sofrer maior deformação.

Figura 29: Influência do *offset* e da rotação sobre a deformação.



Fonte: autoria própria.

4.2. Inspeção visual



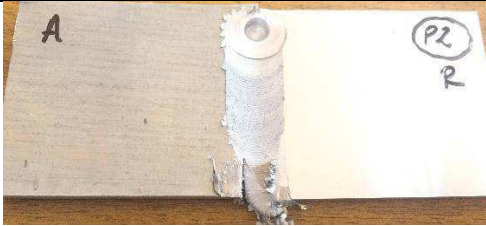


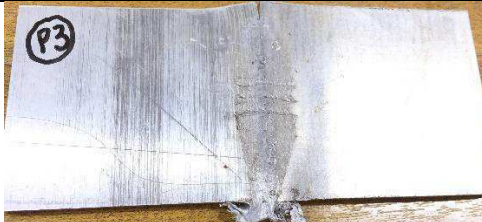




Como primeira etapa de análise das juntas dissimilares soldadas através do processo FSW, foi realizada uma inspeção visual a olho nu, sem o auxílio de qualquer instrumento, com o objetivo de indicar um qualitativo inicial e preliminar das juntas soldadas.


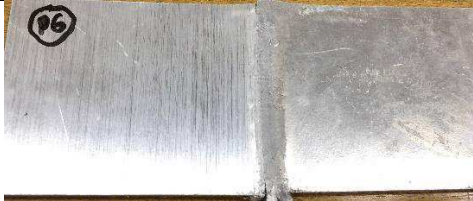










O quadro 19 reproduz as imagens de superfície e de raiz de todas as juntas soldadas com os diferentes parâmetros e que foram inspecionadas visualmente.

Assim, após a análise das juntas do quadro 19, é possível perceber que as soldagens ocorreram de forma satisfatória, sem apresentar defeitos aparentes como porosidade, trincas e excesso de rebarba. Porém, em algumas juntas é notável uma deformação no início da solda, local de entrada da ferramenta de soldagem, ocasionando uma falta de mistura adequada,

problema comum ao processo de soldagem por fricção, aparentemente ocasionado pelo contato brusco da alta rotação e velocidade de avanço da ferramenta com as juntas.

Quadro 19: Inspeção visual da soldagem por FSW da junta dissimilar AA 5083-O e AA 7075-T651.

Parâmetro	Superfície da junta soldada	Raiz da junta soldada
VA: 40 mm/min VR: 350 RPM Offset: 0 mm		
VA: 180 mm/min VR: 350 RPM Offset: 0 mm		
VA: 40 mm/min VR: 870 RPM Offset: 0 mm		
VA: 180 mm/min VR: 870 RPM Offset: 0 mm		
VA: 40 mm/min VR: 350 RPM Offset: 1 mm		

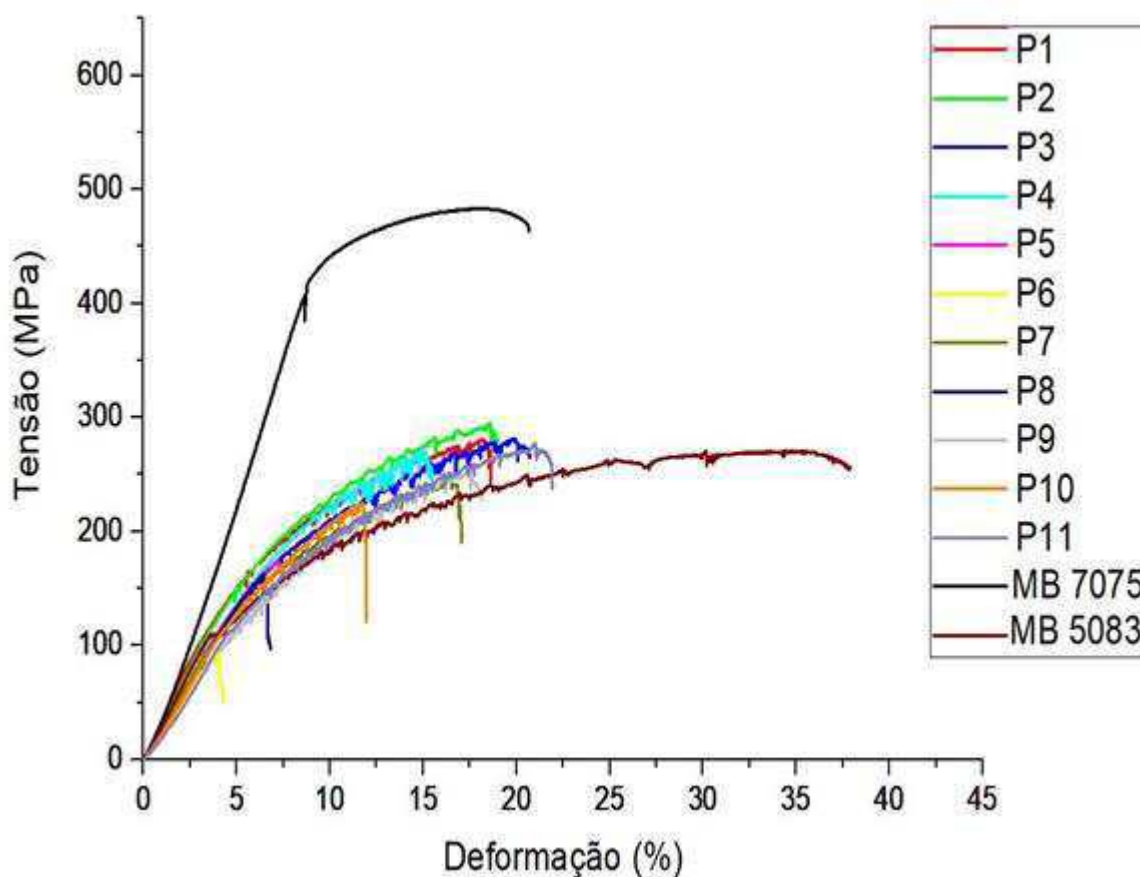
<p>VA: 180 mm/min VR: 350 RPM Offset: 1 mm</p>		
<p>VA: 40 mm/min VR: 870 RPM Offset: 1 mm</p>		
<p>VA: 180 mm/min VR: 870 RPM Offset: 1 mm</p>		
<p>VA: 110 mm/min VR: 610 RPM Offset: 0,5 mm</p>		
<p>VA: 110 mm/min VR: 610 RPM Offset: 0,5 mm</p>		
<p>VA: 110 mm/min VR: 610 RPM Offset: 0,5 mm</p>		

Fonte: autoria própria.

4.3. Ensaio mecânico de tração uniaxial

A fim de averiguar a resistência mecânica das juntas soldadas obtidas por diferentes parâmetros de soldagem, foram realizados ensaios de tração uniaxial. A coletânea destes ensaios pode ser observada na Figura 30. De acordo com Ahn *et al.* (2017), que realizou soldas dissimilares entre ligas da série 6061 com 5083, o comportamento das combinações de materiais diferentes pode variar entre elas dependendo da localização do material em relação à direção de deslocamento da ferramenta, que são os chamados lado de avanço e lado de recuo. No caso citado foi encontrado maior valor de limite de resistência à tração quando a liga não tratável termicamente está no lado de avanço.

Figura 3270: Curva tensão-deformação para as juntas soldadas de alumínio pelo processo FSW e dos Metais de Base.



Fonte: autoria própria.

Ahmed *et al.* (2017), ao realizarem soldas dissimilares da liga AA 5083 e AA 7075 verificaram que o limite de resistência obtido nos ensaios variaram entre 245 MPa e 267 MPa, o que corresponde com a maioria das soldagens realizadas pelos diferentes parâmetros e ilustrados na Figura 30, com exceção das juntas 5, 6 e 8, que atingiram valores menores que 200 MPa. É importante mencionar que esses valores de limite de resistência a tração são maiores do que o metal de base da liga AA 7075.

Os resultados de combinações de materiais dissimilares mostram que os limites de resistência a tração são ligeiramente superiores aos da literatura nas combinações de parâmetros 2 (velocidade de avanço 180 mm/min e velocidade de rotação 350 RPM) e 3 (velocidade de avanço 40 mm/min e rotação 870 RPM). De acordo com Kalemba-Rec *et al.* (2017), que realizaram soldagem dissimilar de ligas de alumínio AA 5083 - H111 e 7075 – T651, as maiores resistências e eficiências de solda ocorreram nas velocidades de rotação da ferramenta de 280 RPM e 355 RPM, como visualizado no parâmetro 2, atingindo valores em torno de 300 MPa. Também foi relatado que, devido a maiores valores de rotação, acima de 500 RPM foi verificado a presença de defeitos macroscópicos.

No entanto, com base na literatura, uma tendência na relação entre a resistência à tração e a velocidade de rotação da ferramenta é ambígua, como pode ser visualizado nos diferentes parâmetros aqui realizados (KALEMBA-REC *et al.*, 2017). Saeidi *et al.* (2015) observaram que, com um aumento na velocidade de rotação da ferramenta de 450 a 800 RPM, a uma velocidade de deslocamento pré-selecionada (30, 41,5 ou 50 mm/min), a resistência à tração não se comportava de uma forma padrão. Foi possível observar esse acontecimento nos parâmetros 3 (velocidade de avanço de 40 mm/min e velocidade de rotação 870 RPM) no qual gerou o maior valor de limite de resistência à tração e o parâmetro 8 (velocidade de avanço de 180 mm/min e velocidade de rotação 870 RPM) com um dos menores valores para resistência à tração.

Já os autores Palanivel *et al.* (2012), notaram uma relação semelhante com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta de 600 RPM para 1300 RPM a uma velocidade transversal constante de 60 mm/s, para diferentes geometrias de pinos, a resistência à tração aumentou inicialmente e diminuiu posteriormente. Cabe aqui enfatizar a importância da análise dos parâmetros em conjunto. Espera-se que com uma menor entrada de calor ocorram menores gerações de precipitados na zona termicamente afetada (GUO *et al.*, 2014). Analisando os resultados, a combinação 40 mm/min com rotação 870 RPM e sem *offset* geram menores

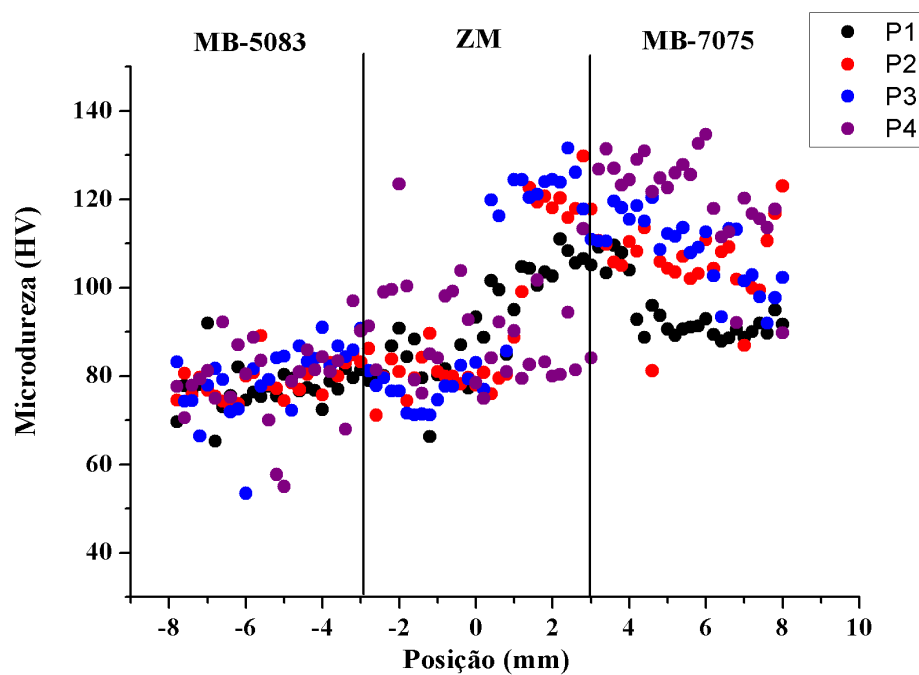
aportes de calor na região soldada, apresentando melhores resultados das propriedades mecânicas. Como também é o caso do parâmetro 2, no qual a combinação de velocidade de avanço 180 mm/min e velocidade de rotação 350 RPM forneceu melhor mistura ao material, além de melhores propriedades.

Sivachidambaram *et al.* (2015) apresentaram três diferentes razões para diferentes velocidades de deslocamento (40, 60 e 80 mm/min). Isto demonstra que o efeito da velocidade de rotação da ferramenta nas propriedades mecânicas não é claro porque é fortemente dependente de outros parâmetros, como por exemplo, a velocidade transversal e o tipo de materiais ligados.

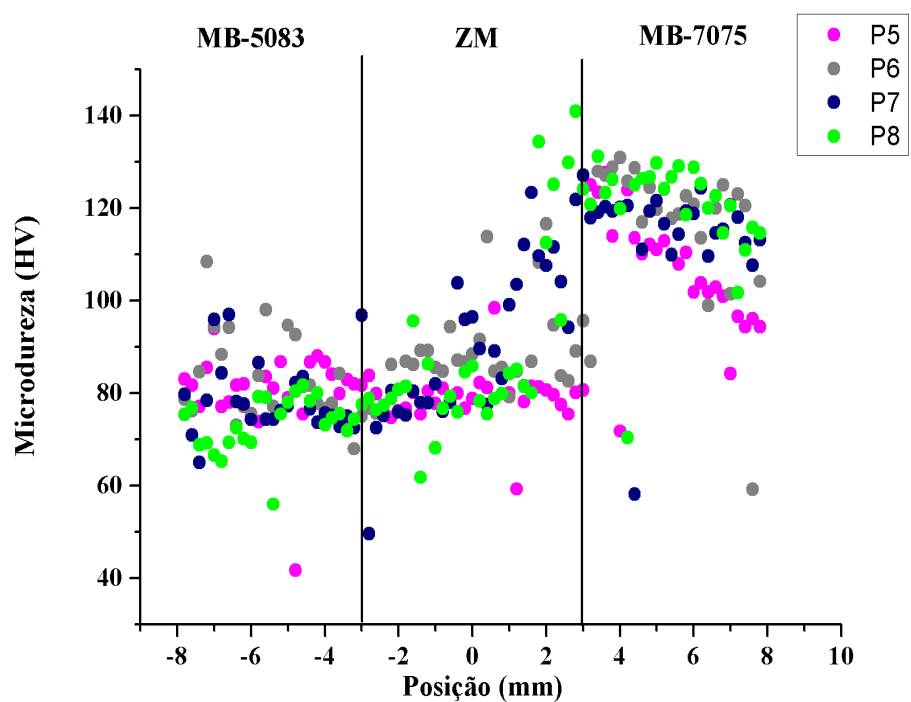
4.4. Ensaio mecânico de dureza Vickers

Com relação às propriedades mecânicas, foram analisados os perfis de dureza das juntas soldadas ao longo da zona misturada (ZM) e do metal de base (MB). Os resultados plotados, observados nas Figuras 31 a 33, revelam que houve uma invariabilidade nos resultados da dureza no lado de avanço, para a zona misturada e um aumento de dureza conforme caminha para o lado de recuo. De acordo com Ahmed *et al.*, (2017) ao soldar juntas dissimilares da liga AA7075 e AA5083 observou três regiões distintas no perfil de dureza, sendo a primeira uma região mais macia que corresponde ao lado de avanço com a liga AA 5083, uma região de dureza mais elevada, correspondendo ao lado de recuo (AA 7075) e uma região intermediária de dureza, com valores entre as duas zonas distintas, conforme observado nas Figuras 31 a 33.

Em geral, quando são realizadas soldagens dissimilares de ligas de alumínio tratáveis termicamente, como no caso das ligas AA 6061 e AA 7075, são visualizadas diminuições da dureza na zona misturada em relação aos seus metais de base correspondentes e isto está associado principalmente ao coalescimento, dissolução e re-precipitação causados pelo ciclo térmico da soldagem (SATO *et al.*, 1999; SU *et al.*, 2003). Na zona misturada, ocorre re-precipitações após a dissolução completa, visto que o material experimentou uma maior temperatura nessa região (GUO *et al.*, 2014). Esse comportamento mencionado nas literaturas citadas acima também pôde ser observado nas soldagens aqui realizadas.

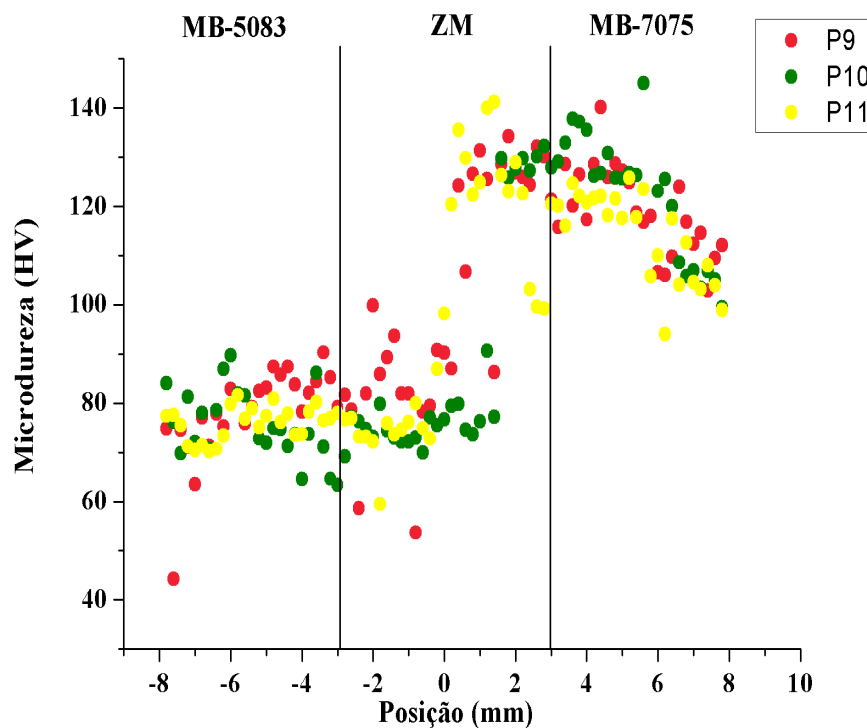
Figura 31: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 0 mm.

Fonte: autoria própria.

Figura 32: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 1 mm.

Fonte: autoria própria.

Figura 33: Perfis de dureza dos parâmetros com *offset* de 0,5 mm.

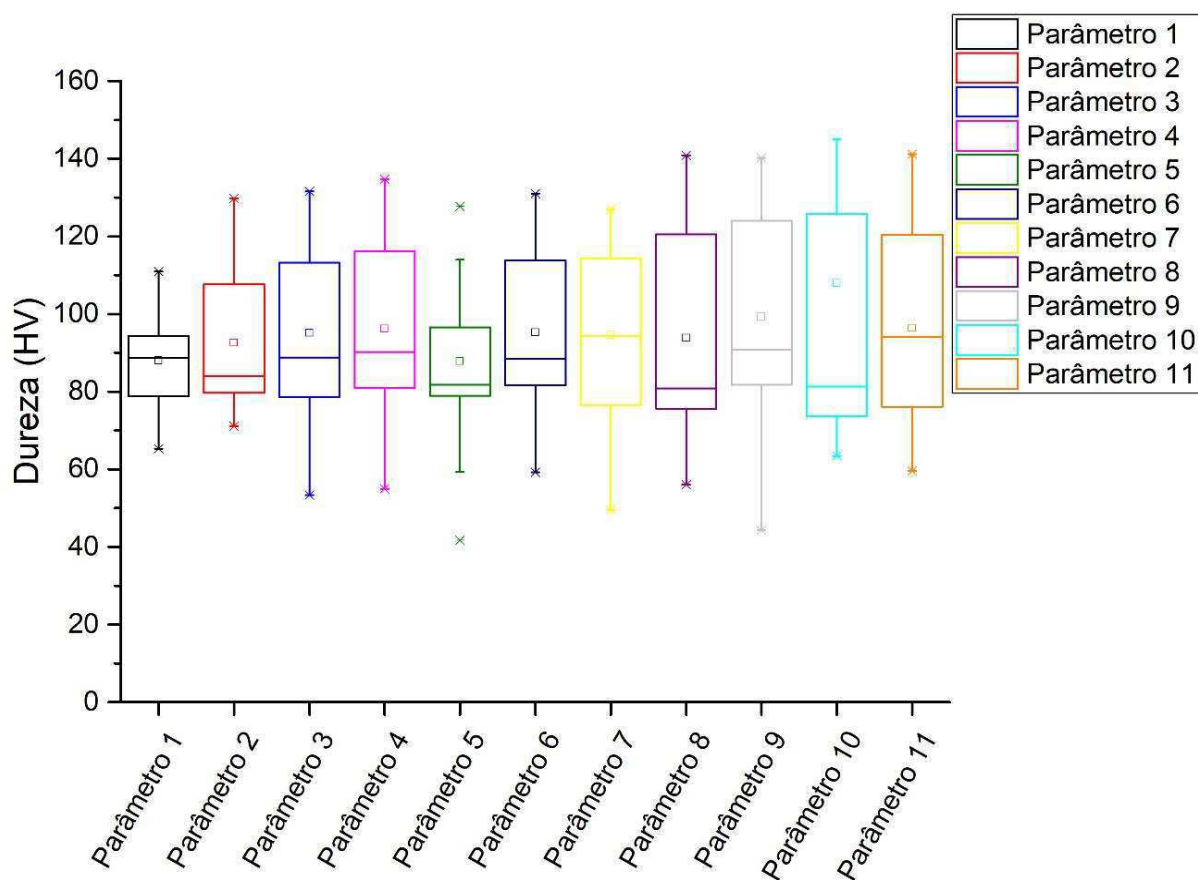


Fonte: autoria própria.

De acordo com Kalembe-Rec *et al.* (2017) as flutuações na dureza dentro da zona misturada estão associadas à mistura dos materiais nesta área, e essa redução da dureza confirma o domínio da liga AA 5083 nessa zona. Esse domínio da liga AA 5083 sofre influência direta do *offset*, podendo-se notar a diminuição de pontos de dureza similares ao da liga AA 7075 a medida em que o *offset* aumenta. Pode-se observar que a dureza média na zona misturada foi de aproximadamente 80 HV (dureza da liga base AA 5083), e este valor permaneceu praticamente constante desde o metal de base da liga AA 5083 até o centro de solda (ponto 0) com a aproximação da liga AA 7075.

Em ligas tratáveis termicamente há uma queda na dureza à medida que a temperatura de pico aumenta na região afetada pelo calor. Isso ocorre porque os precipitados irão coalescer e reduzir a densidade numérica em regiões afastadas da fonte de calor, e irá reentrar em solução quando a temperatura máxima for suficientemente alta (SATO *et al.*, 1999), como foi observado no lado de recuo, onde encontra-se a liga 7075.

Figura 34: Boxplot dos valores de dureza para os onze parâmetros de soldagem.



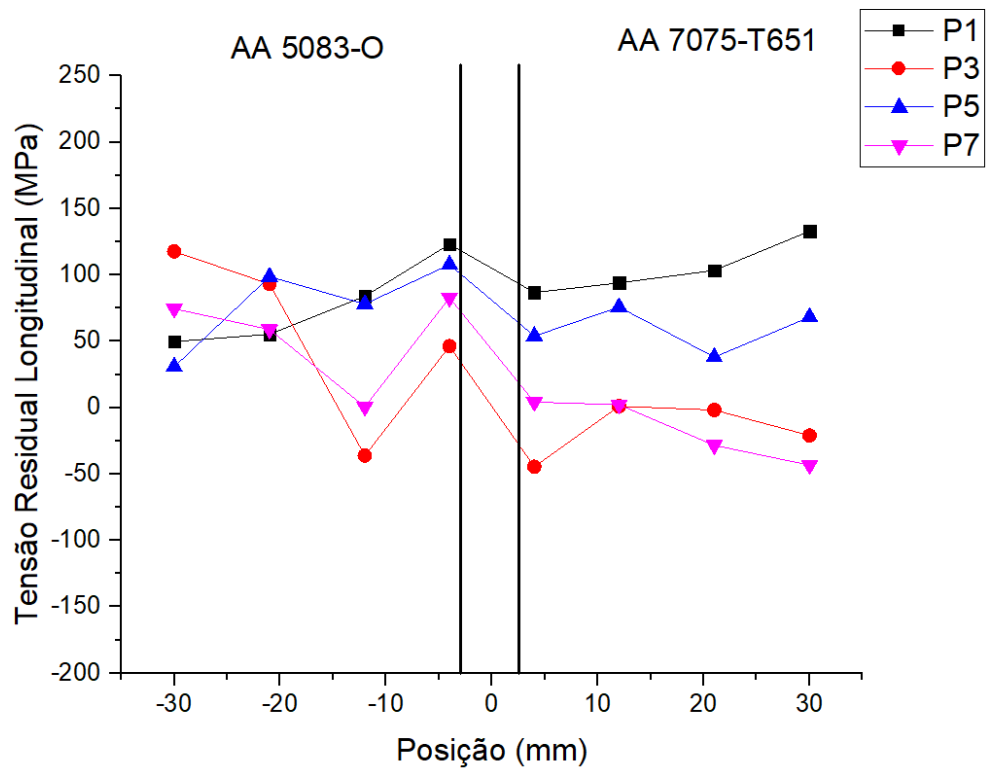
Fonte: autoria própria.

A transição de menores valores de microdureza para maiores se torna menos acentuada nos parâmetros 1 e 5, de acordo com a Figura 34, que ilustra o Boxplot para os parâmetros. Os parâmetros 1 e 5 têm em comum tanto a velocidade de avanço (40 mm/min) como a de rotação (350 RPM). Foi observado por Guo *et al.*, (2014), em soldagens dissimilares entre ligas 6061 e 7075, que menores velocidades de avanço indicaram uma mistura mais eficaz do material.

4.5. Ensaio para medição de tensões residuais

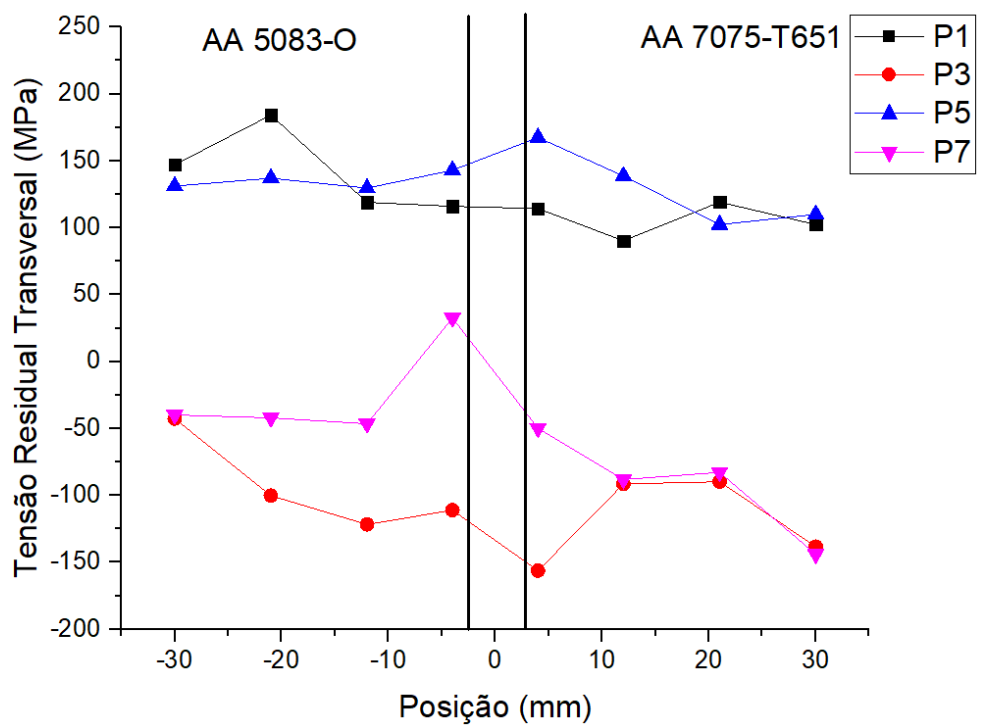
As Figuras 35 a 40 ilustram os perfis de tensões residuais longitudinais e transversais. Quando são realizadas soldagens por métodos convencionais de fusão, surgem na ZTA tensões residuais trativas e na ZM tensões residuais compressivas, já que o aquecimento excessivo nas regiões adjacentes tende a criar tensões térmicas que então, gera as tensões residuais.

Figura 35: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 40 mm/min.



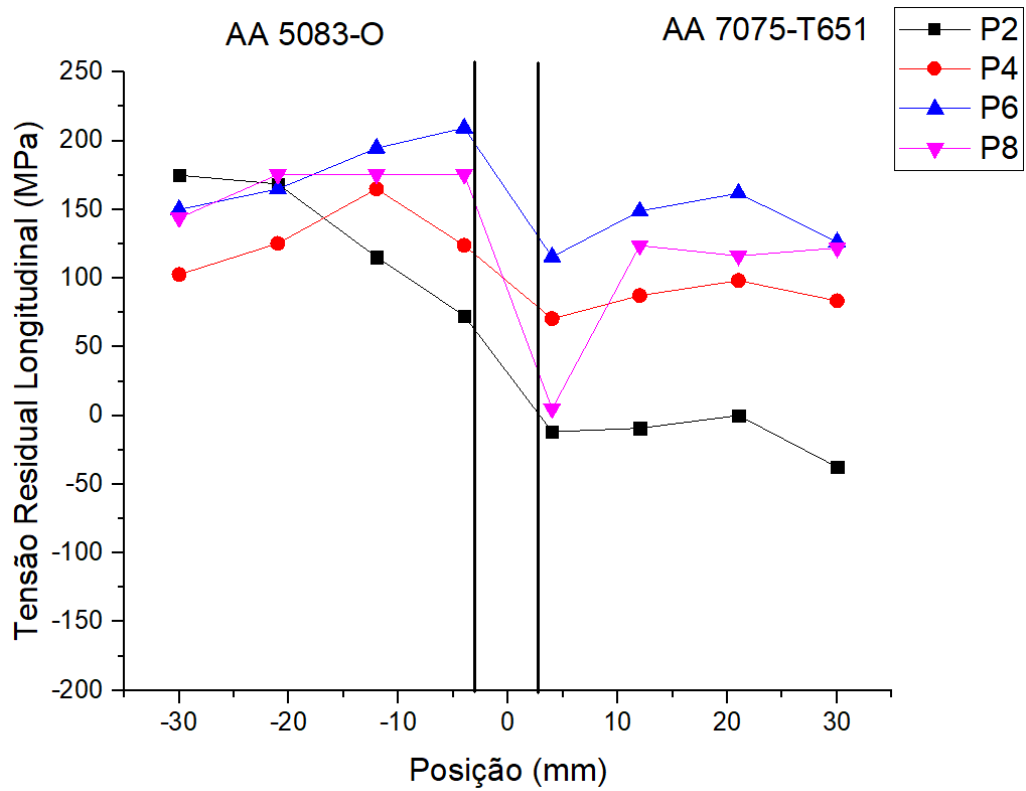
Fonte: autoria própria.

Figura 36: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 40 mm/min.



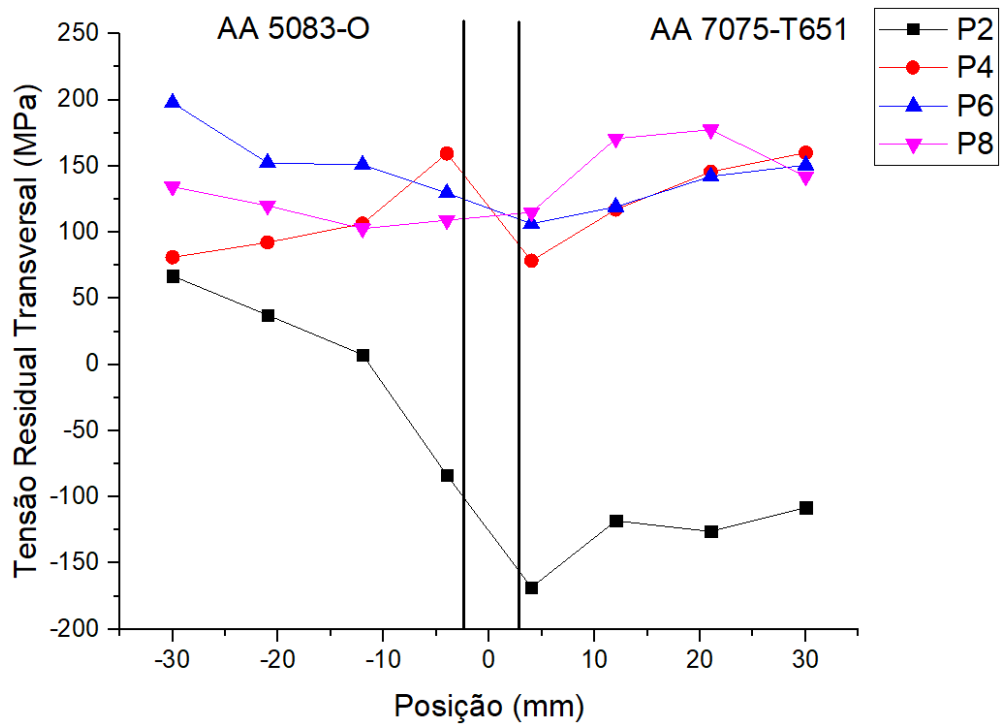
Fonte: autoria própria.

Figura 37: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 180 mm/min.



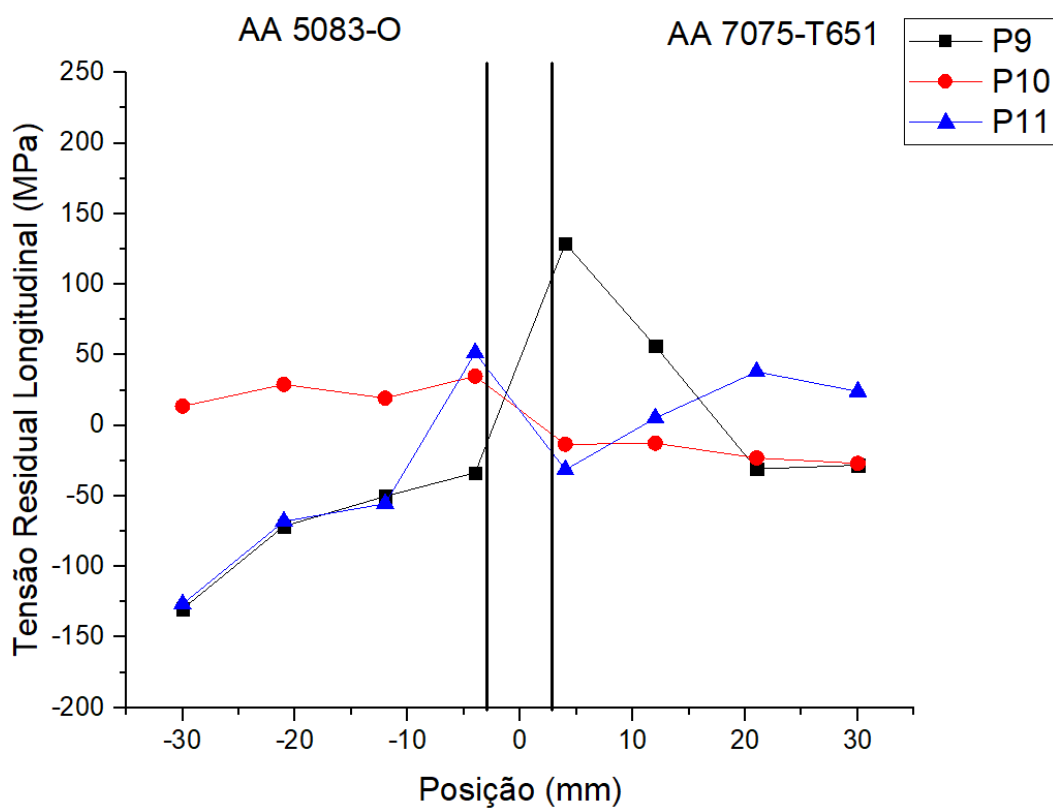
Fonte: autoria própria.

Figura 38: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 180 mm/min.



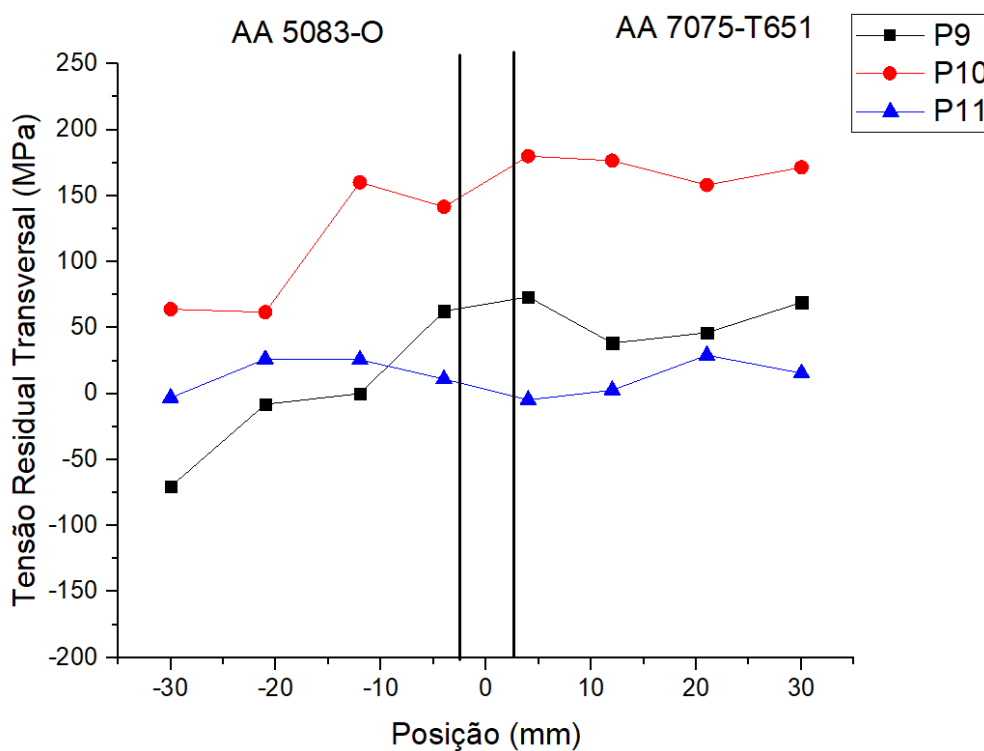
Fonte: autoria própria.

Figura 39: Perfil de tensões residuais longitudinais da velocidade de avanço de 110 mm/min.



Fonte: autoria própria.

Figura 40: Perfil de tensões residuais transversais da velocidade de avanço de 110 mm/min.



Fonte: autoria própria.

Richards *et al.* (2010) e Altenkirch *et al.* (2008), investigaram as tensões residuais em soldas de liga de alumínio de alta resistência pelo processo de soldagem por fricção. Eles encontraram uma distribuição de tensão longitudinal em forma de 'M', onde as tensões residuais de pico de tração estão localizadas, perto do limite da zona de ZTA. O perfil de tensão residual na forma de M foi atribuído por Richards *et al.* (2010) à natureza difusa do campo térmico visto em soldagens FSW em relação a outros processos de soldagem, combinado com o alto nível de amolecimento que ocorre com ligas de alumínio de alta resistência a temperaturas elevadas. Para os casos estudados nesse trabalho, não foram visualizadas distribuições de tensões residuais na forma M, devido as variações nos parâmetros de soldagem, que afeta a entrada de energia e os picos de temperatura máximas atingidas, conforme apresentado nas Figuras 35 a 40, o que também foi observado por Colaço (2019), ao soldar juntas similares de liga de alumínio AA 5083-O pelo processo FSW.

De acordo com Lombard *et al.* (2008), o parâmetro dominante para determinar os picos de tensões residuais é a taxa de avanço da ferramenta, já que ela determina a entrada de calor por unidade de comprimento da solda. Assim, foi fixado como parâmetro de análise para os gráficos de tensões residuais a velocidade de avanço.

Nos gráficos 35 e 36 que correspondem a velocidade de avanço de 40 mm/min pode-se observar que os parâmetros 1 e 5 obtiveram maiores valores de tensões residuais, tanto para as medições longitudinais como transversais, e esses parâmetros possuem a velocidade de rotação de 350 RPM em comum. Já os parâmetros 3 e 7 que possuem a velocidade de rotação de 870 RPM adquiriram tensões residuais compressivas para as medições longitudinais no seu lado de recuo e em todo o perfil transversal. De acordo com Steuwer *et al.* (2006), ao soldarem juntas dissimilares de ligas AA 5083 – AA 6082, o parâmetro velocidade de rotação da ferramenta tem uma influência substancialmente maior do que a velocidade transversal nas propriedades e tensões residuais nas soldas, confirmando os resultados obtidos para esta velocidade de avanço de 40 mm/min.

Já nos gráficos 37 e 38 que representam a velocidade de avanço de 180 mm/min, a influência da rotação não foi tão considerável como para a velocidade de 40 mm/min, visto que os parâmetros 4 e 8 que possuem velocidades de rotação de 870 RPM obtiveram maiores valores de tensões residuais. Neste caso de maior velocidade de avanço o *offset* se destacou com maior influência do que a velocidade de rotação, já que o parâmetro 2 com *offset* de 0 mm obteve tensões residuais compressivas e o parâmetro 6 que difere do parâmetro 2 apenas no seu *offset*

de 1 mm, adquiriu tensões residuais altas. Os picos de tensões residuais trativas no *offset* de 1 mm pode ter ocorrido devido a maior quantidade de material da liga AA 5083-O na mistura da soldagem, já que essa liga encruável por não ser tratada termicamente tende a ter maiores valores de tensões residuais trativas.

Nos gráficos 39 e 40 que representam os pontos centrais do planejamento experimental, o lado de avanço obteve menores valores de tensões residuais do que o lado de recuo, diferentemente dos outros resultados. A impossibilidade de medição da pressão exercida no eixo z durante a soldagem pode ter influenciado a diferença de valores de tensões residuais entre o parâmetro 10 e os outros dois pontos centrais.

Então, tendo em vista a ambiguidade fornecida na literatura, fica claro que o que determina um perfil de tensões residuais com menores valores nas juntas soldadas por fricção é o conjunto dos parâmetros (velocidade de rotação, velocidade de avanço, *offset*, entre outros aqui não mencionados), ou seja, a combinação de parâmetros que forneça uma maior entrada de energia, que leva a um gradiente de temperatura mais acentuado devido a um menor volume de agitação através da ductilidade reduzida do material ao redor da ferramenta (COLEGROVE *et al.*, 2007). No caso do parâmetro 3, com velocidade de avanço de 40 mm/min, rotação de 870 RPM e *offset* de 0 mm, e do parâmetro 2 com velocidade de avanço de 180 mm/min, rotação de 350 RPM e *offset* de 0 mm, foi fornecida uma entrada de energia adequada para redução dos níveis de tensões residuais.

4.6. Ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60°

A fim de qualificar a ductilidade das juntas soldadas foram realizados ensaios de dobramento de raiz a 60°. No quadro 20 é possível observar os valores de carga máxima suportada durante o ensaio para os onze parâmetros.

Dentre todos os parâmetros, o de número 2 apresentou maior valor de carga máxima suportada. De acordo com resultados anteriores, o parâmetro 2 já apresentava um dos menores níveis de tensões residuais trativas. Ao correlacionar a velocidade de avanço de 180 mm/min, rotação de 350 RPM e sem *offset* a mistura do material foi eficaz, evitando defeitos que diminuíssem a qualidade da solda.

Já os parâmetros 8 e 4, que possuem em comum a velocidade de avanço 180 mm/min e a velocidade de rotação 870 RPM, corresponderam aos menores valores de cargas máximas suportadas. O fato pode ter ocorrido devido aos altos valores de avanço e rotação, que não forneceram tempo adequado para a mistura da junta, fazendo com que ocorra um fluxo inadequado do lado de avanço para o lado de recuo.

Quadro 20: Valores das cargas e deslocamentos máximos suportados no ensaio de dobramento a 60°.

Juntas	Carga máxima (N)	Deslocamento máximo (mm)
Junta 1	2099,117	34,175
Junta 2	3012,045	13,637
Junta 3	2305,771	29,347
Junta 4	1870,221	15,694
Junta 5	2421,08	31,339
Junta 6	2799,529	21,347
Junta 7	2200,013	11,403
Junta 8	1766,991	3,857
Junta 9	2090,786	24,453
Junta 10	1883,082	7,265
Junta 11	2342,951	15,408

Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Dentre os resultados da inspeção visual foi possível perceber que as soldagens ocorreram de forma satisfatória, sem apresentar defeitos aparentes. Porém, em algumas juntas é notável uma deformação no início da solda, local de entrada da ferramenta de soldagem, ocasionando uma falta de mistura adequada, problema comum ao processo de soldagem por fricção.

Com relação as propriedades mecânicas, o parâmetro de soldagem 2 (velocidade de rotação: 350 RPM, velocidade de avanço: 180 mm min e *offset*: 0 mm) obteve maior valor de limite de resistência à tração. Em relação aos ensaios de microdureza, os resultados revelam que houve uma invariabilidade nos resultados da dureza no lado de avanço, para a zona misturada e um aumento de dureza conforme caminha para o lado de recuo. De acordo com resultados de dobramento de raiz à 60° a junta 2 apresentou maior valor de carga máxima suportada.

Em termos de tensão residual, o parâmetro 3, com velocidade de avanço de 40 mm/min, rotação de 870 RPM e *offset* de 0 mm, e o parâmetro 2 com velocidade de avanço de 180 mm/min, rotação de 350 RPM e *offset* de 0 mm, forneceram uma entrada de energia adequada para redução dos níveis de tensões residuais.

Através do planejamento experimental fatorial foi notado que os modelos para a resposta de limite de resistência à tração, deformação e carga máxima foram estatisticamente significativos, conforme comprovado pelo teste F.

6. REFERÊNCIAS

ABAL. **Fundamentos do alumínio**. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em <<http://abal.org.br>>. Acesso em: 13 julho de 2017.

AHMED, M. M. Z.; ATAYA, S.; EL-SAYED SELEMAN, M. M.; AMMAR, H. R.; AHMED, E. **Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083**. Journal of Materials Processing Technology. v. 242, p. 77–91. 2017.

AHN, E. Y.; DAS, H.; HONG, S.; HAN, K.; MILES, M.; LEE, K.; PARK, J.; HAN, H. **Process responses and resultant joint properties of friction stir welding of dissimilar 5083 and 6061 aluminum alloys**. Journal of Mechanical Science and Technology. p. 3955-3960. 2017.

ALTENKIRCH, J.; STEUWER, A.; PEEL, M.; RICHARDS, D.; WITHERS, P. **The effect of tensioning and sectioning on residual stresses in aluminium AA7749 friction stir welds**. Materials Science and Engineering. v. 488, p. 16–24. 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS A.5.3-80 **Aluminum and aluminum alloy covered arc welding electrodes**, Miami, FL, 1980.

ASTM B209-14. **Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate**, ASTM International West Conshohocken, PA, 2014.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E., **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.

BATALHA, G. F. Processos de fabricação: Junção, soldagem e brasagem. Material auxiliar ao livro KALPAKJIAN, S. & SCHIMD, S. **Manufacturing Engineering and Technology**, 4 ed., Ed. Prentice Hall, 2001.

BRAY, J.W. **Aluminum Mill and Engineered Wrought Products**. In: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v. 2, ASM Handbook, ASM International, 1992. p. 118-222.

BUTTON, S.T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. São Paulo, Programa de Pós-Graduação de Engenharia mecânica, Unicamp, 2005.

ÇAM, G.; MISTIKOGLU, S. Recent developments in friction stir welding of Al- alloys. **ASW**

International, p. 1936-1953. 2014.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th ed. John Wiley & Sons, USA. 2002.

CAPELARI, T. V. **Friction Stir Welding de placas de alumínio 5652**. In: (Trabalhos de conclusão do curso de Engenharia Mecânica) - 2002. Porto Alegre / RS: Escola de Engenharia da UFRGS/Biblioteca, 2003.

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 Insp.** São Paulo, p. 215-227. 2009.

CHEN, C. M.; KOVACEVIC, R. Parametric finite element analysis of stress evolution during friction stir welding. **J Eng Manuf.** p, 1359-71. 2006.

CHEN, H. B.; YAN, K.; LIN, T.; CHEN, S. B.; JIANG, C. Y.; ZHAO, Y. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. **Materials Science and Engineering A**. 2006; 433(1-2):64-69.

CINDRA, F. M. P. **Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante Ciclos de Fadiga**. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), COPPE/UFRJ, 2000.

CHO, J. H.; BOYCE, D. E.; DAWSON, P. R. Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel. **Material Science and Engineering A**. 2005; 398:146–63.

COCK, T. **Aluminium – A Light Metal**. Oslo: European Aluminium Association. 1999.

COLAÇO, D. B. Caracterização e Avaliação das Tensões Residuais em Juntas da Liga de Alumínio AA 5083-O Soldadas Pelo Processo FSW. 2019, 94 f. (**Mestrado em Engenharia Mecânica**), Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2019.

COLEGROVE, P. A.; SHERCLIFF, H. R.; ZETTLER, R. **Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 12, p. 284–297, 2007.

COPPERMETAL. **Informações técnicas alumínio 7075-T651**. Disponível em http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi7075.pdf. Acesso em: dezembro 2018.

COSTA, L. M.; KORN, M. G. A.; CASTRO, J. T.; SANTOS, W. P. C.; CARVALHO, E.V.; NOGUEIRA, A. R. A. **Planejamento Fatorial Aplicado à Digestão de Amostras de Feijão Assistida por Radiação Microondas**. Quimica Nova. v. 29, p. 149-152. 2006.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N. **Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. 2008. Visão Acadêmica, Curitiba. v 9, n 1. Jan – Jun/2008.

DEBROY, T.; BHADSHIA, H. Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective. **Science and Technology of Welding and Joining**. v. 15, p. 266-270. 2010.

ENGLER, O.; LIU, Z.; KUHNKE, K. **Impact of homogenization on particles in the Al-Mg-Mn alloy AA5454 – Experiment and Simulation**. Journal of Alloys and Compounds, v. 560, p. 111-122, 2013.

FRIGAARD, O.; GRONG, Ø.; MIDLING, O. T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**. 2001; 32:1189–200.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. São Carlos, 2002. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GIPIELA, M. L.; MARTINS, F. Influência dos parâmetros de processo na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo FSW. In: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. **Anais do 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**; 2015 maio 18-22; Salvador, Bahia. Rio de Janeiro: ABCM; 2015. 7 p.

GUO, J. F.; CHEN, C. N.; SUN, G.; BI, G.; SUN, Z.; WEI, J. **Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters**. Materials and Design. v. 56, p. 185-192. 2014.

GUTENSOHN, M.; WAGNER, G.; WALTHER, F.; EITLER D. **The fatigue behavior of friction stir welded aluminium joints**. *Welding in the World*, n. 9-10, p.69-74, 2008.

INFOMET. **Informações técnicas**. Disponível em <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=53>>. Acesso em: dezembro 2018.

KALEMBA-REC, I.; HAMILTON, C.; KOPYŚCIAŃSKI, M.; MIARA, D.; KRASNOWSKI, K. **Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 5083 and 7075 aluminum alloys**. *Journal of Materials Engineering and Performance*. v. 261, p. 32–43. 2017.

KUMAR, S.; ASHOK, D.; NARAYANAN, S. Investigation of friction stir butt welded aluminum alloy flat plates using spindle motor current monitoring method. **Procedia engineering**, v. 64, p. 915-925. 2013.

LEE, Y.; JUNG, S. The joint characteristics of Friction Stir Welding MgZnY alloy. **Materials Science Forum**. v. 475 479, p. 555558. 2005.

LIMA, M. S. S. S. **Avaliação das tensões residuais de juntas soldadas do aço API L X80 utilizado na indústria do petróleo**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica – Universidade Federal de Campina Grande). Campina Grande-PB. 2013.

LOMBARD, H.; HATTINGH, D. G.; STEUWER, A.; JAMES, M. N. **Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy**. *Engineering Fracture Mechanics*. v. 75, p. 341-54. 2008.

LUCENA, I. L. **Otimização do processo de obtenção de biodiesel através da adsorção de água formada durante a reação de esterificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal do Ceará). Fortaleza/CE, 2008.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: processo**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARINHO, M. R. M.; CASTRO, W. B. **Planejamento Fatorial: Uma Ferramenta Poderosa para os Pesquisadores**. Seção de pôster apresentada: XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia; 12-15 set. 2005; Campina Grande, PB, Brasil.

MELADO, M. C. **Estudo de tensões residuais e caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de liga de alumínio AA 5086**. 2014. (Mestrado em

ciências em engenharia mecânica). Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2014.

MELO, R. H. F.; PONTES, M. K. G.; NÓBREGA, J. A.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A. **Efeito sobre a variação dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades de revestimentos de aço inoxidáveis aplicados pelos processos SAW e FCAW.** In: ABM International congress. 2012.

METALTHAGA. **Ligas de Alumínio.** Metalthaga metal service center. Disponível em <<http://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2019.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction stir welding and processing.** Material science and engineering, v. 50, p. 1-78. 2005.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. Friction stir welding and processing. **ASM International**; 2007.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, 2011.

MODENESI, P. J. **Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2012.

MOROZ, I. Soldagem por fricção e mistura da liga de alumínio AA2198-T851 em chapas de diferentes espessuras. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Carlos). São Carlos-SP, 2012.

NANDAN, R.; DebROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. **Progress in Materials Science.** 53 (2008) 980-1023.

NERIS, M. M. **Soldagem.** Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2012.

OKI, S.; TAKAHARA, H.; OKAWA, Y.; TSUJIKAWA, M.; MARUTANI, Y.; HIGASHI, K.

Influence of Continuous Transversal Inclination of Tool on FSW Joints. **Materials Science Forum**. 2007. 539-543, 3850–3855.

OKIMOTO, P. C. **Soldagem**. Departamento de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, E. B. S.; COLAÇO, D. B.; RIBEIRO, M. A.; LIMA, J. S.; MACIEL, T. M.; MELO, R. H. F. Influência da geometria do pino da ferramenta de soldagem nas propriedades mecânicas e tensões residuais de juntas soldadas de ligas de alumínio 5052-O pelo processo FSW. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo (impresso)**, v. 37, p. 69, 2018.

OLIVIECK, N. J.; BESKOW, A. B. **Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio**. *Pespectiva*, Erechim. v.37, n.138, p.15-29, 2013.

PAIVA, J. M.; COSTA, B. M. G.; PINHEIRO, A. D. T.; SANTOS, Z. M.; LUCENA, I. L. **Estudo da adsorção de corantes reativos têxteis a partir do adsorvente a base do bagaço de caju via planejamento experimental**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat. 23° ed. Foz do Iguaçu, 2018.

PALANIVEL, R.; KOSHY-MATHEWS, P.; MURUGAN, N.; DINAHARAN, I. **Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys**. *Materials and Design*. v. 40, p. 7–16. 2012.

PAO, P. S.; GILL, S. J.; FENG, C.R.; SANKARAN, K. K. Corrosion – fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050. **Scripta Materialia**. v. 45, p. 605–612, 2001.

PEEL, M. J.; STEUWER, A.; WITHERS, P. J.; DICKERSON, T.; SHI, Q.; SHERCLIFF, H. **Dissimilar friction stir welds in AA5083–AA6082. Part I: Process parameter effects on thermal history and weld properties**. *Metallurgical and Materials Transactions*. A 37(7):2183–93. 2006.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. **Por que otimização multivariada?** *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.10, n.2, p.106-110, 2005.

RICHARDS, D.; PRANGNELL, P.; WITHERS, P.; WILLIAMS, S.; NAGY, T.; MORGAN, S. **Efficacy of active cooling for controlling residual stresses in friction stir welds**. *Science*

and Technology of Welding and Joining. v. 15, p. 156–165. 2010.

RUANO, G. S. A. Avaliação de tensões residuais em Soldas FSW em alumínio 7050 utilizando acustoelasticidade. 2017. 126 f. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2017.

SAEIDI, M.; MANAFI, B.; GIVI, M.K.B.; FARAJI, G. **Mathematical modeling and optimization of friction stir welding process parameters in AA5083 and AA7075 aluminum alloy joints.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering. v. 1, p. 1–11. 2015.

SANTOS, F. J. Soldagem de alumínio: Influência dos parâmetros de pulso na distorção angular. 2009. 76 f. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.

SATO, Y. S.; KOKAWA, H.; ENOMOTO, M.; JOGAN, S. **Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding.** Metallurgical and Materials Transactions, v. 30, p 2429 – 37, 1999.

SATO, Y.; URATA, M.; KOKAWA, H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. **Metallurgical and Materials Transactions A.** 2002; 33(3):625–35.

SEGATTI, F. Soldagem por fricção e mistura mecânica: Avaliação dos parâmetros de processo através da análise do perfil de temperatura ao longo da solda, microestrutura e propriedades mecânicas de uma liga de alumínio. **Trabalho de Final de Curso.** Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, URI, Erechim, 2011.

SENAI. **Mecânica: Noções Básicas de Processos de Soldagem e Corte.** CPM – Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção, Espírito Santo, 1996.

SIVACHIDAMBARAM, S.; RAJAMURUGAN, G.; AMIRTHARAJ, D. **Optimizing the parameters for friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA5383/AA7075.** ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. v. 105, p. 434–437. 2015.

STELL, R.; LIU, Q.; COLLIER, M.; PETERSO, J. Friction Stir Welding: new developments for oil and gas industry. **Society of Petroleum Engineers.** 2010.

- STEUWER, A.; PEEL, M. J.; WITHERS, P. J. **Dissimilar friction stir welds in AA5083-AAA6082: the effect of process parameters on residual stress.** *Materials Science Engineering. A* 441:187–96. 2006.
- SU, J. Q.; NELSON, T. W.; MISHRA, R.; MAHONEY, M. **Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium.** *Acta Materialia.* v. 51, p.713-729, 2003.
- THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. Friction stir welding - recent developments in tool and process technologies. **Advanced Engineering Materials.** 2003; 5:485–90.
- THREADGILL, P. L.; LEONARD, A.; SHERCLIFF, H.; & WITHERS, P. Frictions stir welding of aluminium alloys. **International Materials Reviews,** v. 54(2), pp. 49-93. 2009.
- WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. **Soldagem processos e metalurgia.** São Paulo: Edgard Blucher LTDA., 1992.
- WHITE MARTINS. **Soldagem do alumínio e suas ligas.** Disponível em <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo96.pdf>>. Acesso em: 09 de dezembro, 2017.