



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



DÉBORAH BRITO COLAÇO

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM
JUNTAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 5083-O SOLDADAS PELO
PROCESSO FSW**

CAMPINA GRANDE

2019

DÉBORAH BRITO COLAÇO

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM
JUNTAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 5083-O SOLDADAS PELO 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: Processos Mecânico – Metalúrgicos

Orientador: Dr. Theophilo Moura Maciel

Coorientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

C683c

Colaço, Déborah Brito.

Caracterização e avaliação das tensões residuais em juntas da liga de alumínio AA 5083-0 soldadas pelo processo FSW / Déborah Brito Colaço. – Campina Grande, 2019.

95 f.: il. color.

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

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

Referências.

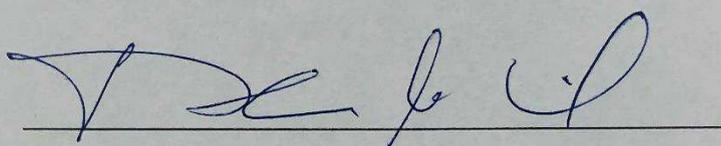
1. *Friction stir welding*. 2. Ligas de alumínio. 3. Tensões residuais. 4. Propriedades mecânicas. I. Maciel, Theophilo Moura. II. Melo, Raphael Henrique Falcão de. III. Título.

CDU 621.791(043)

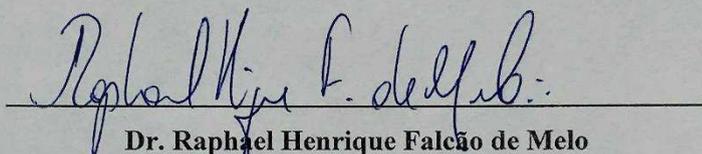
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS DE ALUMÍNIO AA
5083-0 SOLDADAS PELO PROCESSO FSW

DÉBORAH BRITO COLAÇO

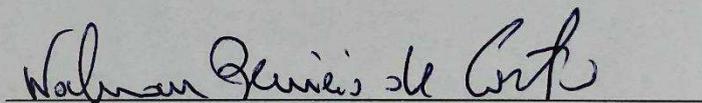
Dissertação Aprovada em 28/02/2019 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



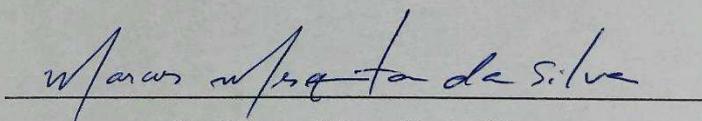
Dr. Theophilo Moura Maciel
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



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



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



Dr. Marcos Mesquita da Silva
Examinador Externo
IFPB

DEDICATÓRIA

*Por você, para você:
Arthur Felipe Brito Colaço.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos.

Aos meus pais, minha base, Hermes Colaço da Costa Filho e Roângela Alves Brito Colaço, que acreditam em mim e comemoram todas as minhas conquistas.

Ao meu irmão, meu melhor amigo, meu amor, que sempre cuidou/cuida de mim.

Ao meu companheiro Matheus Apolinário Ribeiro, que nunca me deixou desistir e sempre me auxiliou/auxilia em todos os momentos.

Sou eternamente grata aos meus orientadores, Theophilo Moura Maciel e Raphael Henrique Falcão de Melo, por me darem a oportunidade de trabalhar em conjunto, por compartilhar ensinamentos, tanto profissionais como pessoais.

Aos familiares e amigos que torcem pelo meu crescimento profissional e pessoal.

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

Por fim, aos técnicos do laboratório e alunos que auxiliaram no desenvolvimento da dissertação, em especial a Yan Navarro, Oclávio Santos e a todos do PET de matemática.

COLAÇO, D.B. Caracterização e Avaliação das Tensões Residuais em Juntas da Liga de Alumínio AA 5083-O Soldadas Pelo Processo FSW. 2019, 95 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 de juntas soldadas da liga de Alumínio - Magnésio AA5083-O utilizando o processo *Friction Stir Welding*. Inicialmente, foi realizada a fabricação de doze perfis de ferramenta de geometria de pinos diferentes a fim de selecionar o melhor perfil para a realização da soldagem FSW. Logo em seguida foram realizadas as soldagens por fricção e mistura mecânica adotando um planejamento experimental fatorial $2^3 + 3$ pontos centrais para avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas. 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 os ensaios de tração uniaxial, dureza Vickers, dobramento de raiz à 60° e, por fim, microscopia ótica. Dentre as geometrias de ferramentas estudadas, ficou evidente que o pino rosqueado cilíndrico de ponta arredonda forneceu melhor mistura e melhores valores de resistência à tração. Através do planejamento experimental realizado, as soldagens pelo processo FSW com ângulo de inclinação da ferramenta de 3° estabeleceu melhores resultados, devido a melhor mistura do material. Os melhores resultados de resistência à tração e de um menor nível de tensões residuais foram obtidos utilizando-se velocidade de rotação da ferramenta 340 RPM com velocidades de avanço de 180 mm/min e 70 mm/min, respectivamente.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, ligas de alumínio, tensões residuais, propriedades mecânicas.

COLAÇO, D.B. Characterization and Evaluation of Welded Joints of the Aluminum Alloy AA 5083-O by the FSW Process. 2019, 95 f. (**Master degree in Mechanical Engineering**), Federal University of Campina Grande. Graduate Program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2019.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the residual stresses and mechanical properties of Aluminum - Magnesium AA5083-O welded joint using the *Friction Stir Welding* (FSW) process. Initially, twelve tool profiles with different pin geometries were fabricated in order to select the best profile for FSW welding. After that the welds were carried out by friction and mechanical mixing, adopting a 2^3 factorial experimental design with 3 central points to evaluate the influence of the welding parameters on the welded joint mechanical properties. To determine the residual stresses, a variation of the blind hole technique was performed using the coordinate table for measurements. For mechanical characterization, uniaxial traction, Vickers hardness and root folding at 60° test and optical microscopy were performed. Among the tool geometries studied, it was evident that the cylindrical threaded pin with rounded tip provided better mixing and better properties values. The FSW process with 3° tool inclination angle presented better results due to better mixing of the material. The best results in relation to mechanical resistance and residual stress level were obtained using 340 RPM and 180 mm/min and 70 mm/min of rotational and advance tool speed, respectively.

Keywords: *Friction Stir Welding*, aluminum alloys, residual stresses, mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Materiais usados na construção do Boeing 787.

Figura 2: Área externa do barco Paratii 2.

Figura 3: Diagrama de fase Alumínio – Magnésio.

Figura 4: Cronologia dos processos de soldagens.

Figura 5: Ilustração do processo de soldagem FSW.

Figura 6: Junta soldada pelo processo FSW de uma liga de alumínio.

Figura 7: Aplicabilidade da soldagem FSW na construção naval.

Figura 8: Ângulo de inclinação da ferramenta de soldagem por FSW.

Figura 9: Representação esquemática do processo FSW e das forças que atuam sobre a ferramenta.

Figura 10: Traços de fluxo em diferentes planos horizontais (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm e (c) 2,28 mm abaixo da superfície superior por uma chapa de aço inoxidável de espessura 3,18 mm.

Figura 11: Defeito superficial do tipo excesso de rebarba de uma chapa de alumínio soldada pelo processo FSW.

Figura 12: Microestrutura típica da soldagem FSW.

Figura 13: Sistema de medição por mesa de coordenadas.

Figura 14: Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.

Figura 15: Ferramentas de soldagem confeccionadas em 12 perfis diferentes de pinos.

Figura 16: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat.

Figura 17: Esquema da junta de topo empregada neste trabalho.

Figura 18: Corpo de prova para o ensaio de tração seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

Figura 19: Posição onde foram realizadas as impressões de dureza.

Figura 20: Máquina de ensaio universal MTS, modelo 810.

Figura 21: Corpo de prova para o ensaio de dobramento de raiz a 60°.

Figura 22: Esquema da furação para aferição da tensão residual (dimensões em milímetros).

Figura 23: Aparelho utilizado no polimento eletrolítico.

Figura 24: Dimensão da placa soldada pelo processo FSW.

Figura 25: Gráfico tensão versus deformação obtido no ensaio de tração uniaxial.

Figura 26: Principais valores obtidos no ensaio de tração uniaxial.

Figura 27: Valores obtidos do ensaio de dureza Vickers de alguns perfis de ferramenta.

Figura 28: Boxplot dos valores de dureza para as 12 ferramentas avaliadas.

Figura 29: Corpos de prova após o ensaio de dobramento a 60°.

Figura 30: Gráfico de tensão versus deformação obtido no ensaio de tração uniaxial.

Figura 31: Gráfico de tensão versus deformação obtido no ensaio de tração uniaxial sem o metal de base.

Figura 32: *Boxplot* dos parâmetros de soldagem pelo processo FSW.

Figura 33: Gráfico de carga versus deslocamento obtido no ensaio de dobramento de raiz a 60°.

Figura 34: Gráficos de tensão versus distância obtidos nas medições de tensões residuais longitudinais pela soldagem FSW.

Figura 35: Gráficos de tensão versus distância obtidos nas medições de tensões residuais transversais pela soldagem FSW.

Figura 36: Microscopia ótica da microestrutura do metal de base AA 5083-O.

Figura 37: Microscopia ótica da microestrutura da zona soldada pelo processo FSW.

Figura 38: Microestrutura da região de transição entre as zonas misturada, termomecanicamente afetada e termicamente afetada.

Figura 39: Influência da velocidade de avanço e ângulo de inclinação sobre a dureza nas soldagens por FSW.

Figura 40: Influência da velocidade de rotação e ângulo de inclinação sobre a dureza nas soldagens por FSW.

Figura 41: Influência da velocidade de rotação e ângulo de inclinação sobre a deformação nas soldagens por FSW.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades gerais do alumínio.

Quadro 2: Séries da liga de alumínio e seus principais elementos.

Quadro 3: Composição química das principais ligas de alumínio – magnésio.

Quadro 4: Composição química nominal da liga de alumínio AA 5083.

Quadro 5: Composição da liga AA 5052-O.

Quadro 6: Composição da liga AA 5083-O.

Quadro 7: Perfis da geometria do pino da ferramenta.

Quadro 8: Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.

Quadro 9: Planejamento experimental fatorial 23 + 3 pontos centrais para FSW.

Quadro 10: Defeitos encontrados na soldagem pelo processo FSW.

Quadro 11: Placas soldadas por diferentes geometrias de pinos.

Quadro 12: Resumo dos defeitos visuais encontrados nas peças soldadas.

Quadro 13: Resultados do ensaio de tração obtidos por Capelari e Mazzafero (2009).

Quadro 14: Carga máxima suportada no ensaio de dobramento para as juntas soldadas pelas 12 ferramentas diferentes.

Quadro 15: Placas soldadas por diferentes parâmetros de soldagem

Quadro 16: Matriz planejamento e resultados obtidos

Quadro 17: Valor de P para os fatores e interações.

Quadro 18: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 90%.

Quadro 19: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de dureza.

Quadro 20: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de LRT.

Quadro 21: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de CM.

Quadro 22: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de deformação.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

FSW – *Friction Stir Welding*

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

AA - *Alluminum. Association*

O - Reozimento

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

TWI – *The Welding Institute*

MB – Metal de base

ZF – Zona fundida

ZM – Zona misturada

ZTA – Zona termicamente afetada

ZTMA – Zona termomecânica afetada

LE – Limite de escoamento

LRT – Limite de resistência à tração

DEF – Deformação à fratura

U – Velocidade

ω - Velocidade angular

r – Distância radial

θ - Ângulo

δ – Extensão do escorregamento

μ_f – Coeficiente de atrito

P - Pressão

dA – Área elementar

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Justificativa.....	20
1.2. Objetivos	21
1.2.1. OBJETIVO GERAL	21
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3. Organização da Dissertação.....	21
CAPÍTULO II.....	23
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1. Alumínio	23
2.1.1. LIGAS DE ALUMÍNIO – MAGNÉSIO	26
2.1.2. LIGA ALUMÍNIO – MAGNÉSIO AA 5083	29
2.2. Soldagem.....	30
2.2.1. <i>FRICITION STIR WELDING</i> (FSW)	32
2.2.1.1. Vantagens e desvantagens do processo FSW	34
2.2.1.2. Parâmetros de soldagem por FSW	36
2.2.1.3. Geração de calor	38
2.2.1.4. Fluxo de materiais e mecanismo de união	39
2.2.1.5. Defeitos causados pela soldagem por FSW	40
2.2.1.6. Propriedades e microestruturas da soldagem de ligas de alumínio pelo	

processo FSW.....	41
2.3. Tensões residuais.....	43
2.3.1. TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	44
2.3.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS	45
2.3.2.1. Medição de tensões residuais utilizando a mesa de coordenadas	45
2.4. Planejamento experimental	46
2.4.1. VANTAGENS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	47
CAPÍTULO III	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1. Caracterização da pesquisa.....	49
3.2. Materiais	50
3.3. Processos de soldagem	51
3.3.1. ESCOLHA DO PERFIL DE FERRAMENTA	51
3.3.2. EXECUÇÃO DAS SOLDAGENS COM A LIGA AA 5083-O.....	54
3.4. Metodologia de ensaios	55
3.4.1. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	55
3.4.2. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS	56
3.4.3. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°	57
3.4.4. ENSAIO PARA MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS	58
3.4.5. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	59
CAPÍTULO IV.....	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60

4.1. Escolha do perfil de ferramenta	60
4.1.1. INSPEÇÃO VISUAL.....	60
4.1.2. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	64
4.1.3. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS	66
4.1.4. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°	68
4.1.5. ANÁLISE DOS ENSAIOS PARA A ESCOLHA DA FERRAMENTA	70
4.2. Caracterização das juntas soldadas da liga AA 5083-O.....	71
4.2.1. INSPEÇÃO VISUAL.....	71
4.2.2. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	73
4.2.3. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS	75
4.2.4. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°	76
4.2.5. ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL	77
4.2.6. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	80
4.3. Planejamento experimental fatorial.....	82
4.3.1. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A DUREZA MÉDIA.....	86
4.3.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A DEFORMAÇÃO.....	87
4.4. Conclusões	88
5. REFERÊNCIAS.....	89

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A procura por materiais mais leves, com boas propriedades mecânicas e uma alta resistência à corrosão vem crescendo cada vez mais nas indústrias automotivas e aeroespaciais. Nesta procura, o alumínio surge como uma alternativa devido ao seu conjunto de propriedades, entre eles a facilidade de reciclagem, destacando-se como uma vantagem para a preservação do meio ambiente, além de sua combinação com diversos materiais utilizados na engenharia, formando assim as de ligas alumínio.

Soluções sólidas constituídas de dois ou mais materiais dispersos em uma única fase, as ligas têm características diferentes dos seus constituintes, apresentando propriedades adequadas e melhoradas para diversos fins. A adição de elementos de liga ao alumínio permite o desenvolvimento de outras propriedades, que ampliam ainda mais sua aplicabilidade (FERRARI, 2008; ABAL, 2016). A função de cada liga se altera de acordo com o elemento da liga e a quantidade desses elementos presentes na liga.

Dentre as ligas de alumínio, tem-se a AA 5083 – liga de alumínio e magnésio, que tem como principal característica a elevada resistência a corrosão combinado com um excelente equilíbrio de propriedades mecânicas, sendo utilizada para diversos fins, principalmente como material estrutural nas aplicações de transporte (RAO *et al.*, 2013). Devido ao número elevado de aplicabilidade das ligas de alumínio e magnésio, o processo de união por soldagem se torna uma etapa indispensável para formações de materiais com geometrias complexas.

Os processos tradicionais de soldagem por fusão promovem a formação de compostos intermetálicos (CIM) do tipo Fe_xAl_y , que diminuem significativamente a tenacidade da junta (AGUDO, et al, 2007). Além da formação de intermetálicos, a soldagem por fusão pode apresentar juntas com diversos problemas, entre eles: crescimento dos grãos, formação de estruturas brutas de solidificação, geração de espaços vazios, distorção após a soldagem, tensões residuais elevadas, entre outros (LEE; JUNG, 2005).

As tensões residuais são consideradas as principais causas de falha e rompimento de juntas soldadas. Como discutido por Withers (2007), as tensões residuais podem ser produzidas durante os processos de soldagem e são particularmente preocupantes nas aplicações aeroespaciais, pois podem levar a falhas prematuras por fadiga. Elas são definidas como tensões

existentes em um material sob condições de temperaturas uniformes e sem a ação de carregamentos externos (FONSECA, 2000) e aparecem como uma resposta elástica do material à distribuição heterogênea das deformações elásticas ou plásticas não uniformes e permanentes (ROSENFELD, 2002).

Como alternativa para a soldagem de alumínio e suas ligas, surge, em 1991, no *The Welding Institute*, o *Friction Stir Welding* (FSW) – soldagem por fricção e mistura mecânica, uma das invenções tecnológicas mais importantes na área de processos e metalurgia da soldagem (OLIVIECKI; BESKOW, 2013). O processo é baseado em uma ferramenta rotativa com perfil característico e não consumível, que penetra na linha de junção e se desloca ao longo desta linha, gerando calor por atrito promovendo o aumento da ductilidade do material, fazendo com que o mesmo escoe no sentido da ferramenta (OLIVIECKI; BESKOW, 2013).

Dentre as principais vantagens do processo de soldagem FSW pode-se citar: 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).

Neste contexto, avaliar a influência dos parâmetros de soldagem (velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de deslocamento da ferramenta e geometria da ferramenta) sobre o perfil de tensões residuais e sobre as propriedades mecânicas de juntas soldadas pelo processo FSW é de relevante interesse para a consolidação deste processo para união de ligas de Al.

1.1. Justificativa

Atualmente, o processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) vêm ganhando espaço devido a facilidade e melhorias que o processo traz em relação aos métodos convencionais de soldagem por fusão ao arco elétrico. Neste contexto, é importante estabelecer parâmetros de soldagem que melhorem as propriedades das juntas soldadas, além de aumentar a vida útil dos materiais soldados.

1.2. Objetivos

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar os níveis de tensões residuais e as propriedades mecânicas de juntas soldadas da liga de Alumínio - Magnésio AA 5083-O utilizando o processo *Friciton Stir Welding* (FSW).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os melhores parâmetros de soldagem e o melhor perfil geométrico da ferramenta para a soldagem das ligas pelo processo FSW;
- Determinar as propriedades mecânicas, perfis de microdureza e microestrutura das juntas soldadas pelos processos FSW;
- Relacionar as propriedades mecânicas, as microestruturas e os perfis de microdureza resultantes no metal de solda e na zona termicamente afetada com os níveis de tensões residuais nas juntas soldadas pelo processo FSW.

1.3. Organização da Dissertação

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 a liga de estudo, 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 maquinários utilizados.

- Capítulo IV: contém os resultados da pesquisa: a escolha da ferramenta, os melhores resultados obtidos da caracterização das juntas soldadas pelo processo FSW e os valores obtidos de tensões residuais, 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

Neste capítulo será abordado os principais conceitos necessários para o entendimento da pesquisa realizada, para isso buscou-se trabalhos fundamentais para o embasamento teórico. O capítulo divide-se em introdução, que será explanado de forma resumida os tópicos dos seguintes subcapítulos: alumínio, onde mencionará suas principais propriedades, utilizações e classificações, principalmente da liga da série 5000, que corresponde ao material utilizado para esta pesquisa; a soldagem, abordando sua importância e o processo de soldagem por fricção e mistura mecânica; tensões residuais, informando suas origens e causas e, por fim, planejamento experimental, mostrando a importância dessa ferramenta para trabalhos científicos e controle de processos industriais.

2.1. Alumínio

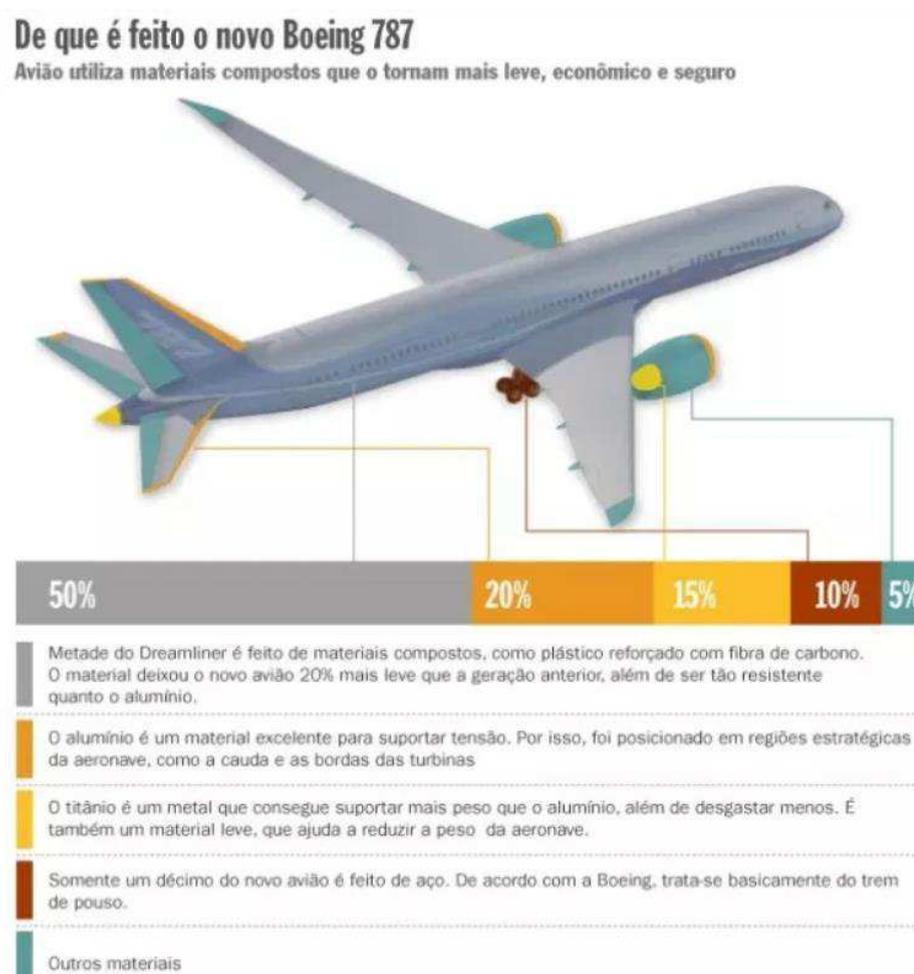
Quando se relaciona a crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade ao requisito de redução de consumo e preservação do meio ambiente, o alumínio se destaca pelo seu conjunto de propriedades, tais como: baixa densidade, alta resistência à corrosão, boa tenacidade, excelente conformabilidade, alta condutibilidade térmica e elétrica e a possibilidade de reciclagem. O aumento vertiginoso no consumo do alumínio nos últimos anos é a prova do que este metal significa para a indústria atual (ABAL, 2007).

O alumínio, metal não-ferroso de maior consumo na indústria moderna, está entre os metais mais abundantes na crosta terrestre na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3) com as reservas minerais quase ilimitadas (ABAL, 2007). De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (2007) sua principal obtenção se dá através da extração da bauxita, minério composto por cerca de 40% de óxidos de alumínio, tendo suas jazidas localizadas, principalmente, em regiões tropicais.

A ampla variedade de utilização do alumínio se deve a multiplicidade de propriedades do material e à grande possibilidade de combinar estas propriedades de forma dirigida, sendo dessa forma utilizados na construção civil e nas indústrias em geral (REIS, 2006). Na Figura 1 é possível visualizar a aplicabilidade do alumínio na construção do Boeing 787, em regiões

estratégicas da aeronave, como caldas e bordas das turbinas (VALDUGA, 2011).

Figura 1: Materiais usados na construção do Boeing 787.



Fonte: Valduga, (2011).

No Quadro 1 é possível verificar as principais características do alumínio, as quais conferem ao material extrema versatilidade. Porém, devido à resistência limitada do metal puro, o alumínio puro se restringe a certas aplicações em que exige pequenos esforços mecânicos. Como solução, as indústrias do alumínio passaram a estudar formas de produção de ligas de alumínio com propriedades mecânicas elevadas (ABAL, 2007).

A adição de elementos de liga ao alumínio permite o desenvolvimento de outras propriedades, que ampliam mais sua aplicabilidade (FERRARI, 2008; ABAL, 2016). O principal alvo dos elementos de adição é aumentar a resistência mecânica e a resistência a corrosão do alumínio, sem detrimento para as outras propriedades do mesmo, tornando as ligas de alumínio atraentes para usos nas áreas da construção mecânica. O Quadro 2 ilustra as séries e os principais elementos de adição nas ligas do alumínio.

Quadro 1: Propriedades gerais do alumínio.

PROPRIEDADES GERAIS DO ALUMÍNIO	
Massa atômica	29,98
Número atômico	13
Peso específico (20°C)	2,70 kgf/dm ³
Temperatura de fusão	660,2°C
Temperatura de ebulição	2,46°C
Limite de resistência (recozido)	4,8 kgf/mm ²
Limite de escoamento (recozido)	1,0 kgf/mm ²
Alongamento (recozido)	65%

Fonte: Modificado de Associação técnica de Brasil - Alemanha (2003).

Quadro 2: Séries da liga de alumínio e seus principais elementos.

SÉRIES E ELEMENTOS DE LIGA	
1XXX	Alumínio puro
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

Fonte: Modificado de White Martins (2017).

De acordo com Reis (2006): “algumas ligas de alumínio possuem a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas apenas por meio do trabalho a frio”, sendo assim, as ligas de alumínio são divididas convenientemente em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente, que propiciam maior resistência, e as ligas não-tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada por meio do trabalho a frio.

As ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. Os principais tipos de tratamento térmico são: homogeneização, solubilização e envelhecimento, recozimento pleno, recozimento parcial e estabilização e têm como objetivos remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas, tais como: propriedades mecânicas, tamanho dos grãos, entre outras (REIS, 2006).

Já as ligas não-tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos térmicos como de estabilização e recozimentos plenos ou parciais. O tratamento térmico de estabilização além de aliviar a tensão residual dos materiais encruados, aumenta a resistência à corrosão (ABAL, 2019). O recozimento pleno é um tratamento térmico em que se obtém as condições de plasticidade máxima do metal, correspondendo a uma recristalização total do mesmo. Já o recozimento parcial corresponde a uma recristalização parcial do material, conferindo ao material uma maior resistência mecânica (ABAL, 2019).

Considerado metais não-ferrosos duráveis, com excelentes características e propriedades mecânicas, como já mencionado anteriormente, estas ligas podem ser utilizadas em embalagens para indústria alimentícia e de medicamentos, na produção de utensílios domésticos, nas indústrias automotivas e aeroespaciais, fios e cabos, no mercado de materiais para construção civil e entre outras diversas aplicabilidades.

2.1.1. LIGAS DE ALUMÍNIO – MAGNÉSIO

As ligas de alumínio têm sido desenvolvidas a partir da combinação materiais de acordo com as propriedades necessárias a aplicações específicas. O principal objetivo das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica do alumínio sem prejuízo as demais propriedades. Quando fundido, o alumínio dissolve outros materiais e substâncias metaloides e, durante o

processo de resfriamento e solidificação, alguns constituintes da liga são retidos em soluções sólidas, que tendem a precipitar na forma de partículas duras, consistindo de compostos intermetálicos, o que tornam a rede cristalina mais rígida (ABAL, 2016). Dessa forma, as ligas de alumínio têm a resistência necessária para aumentar a sua aplicabilidade industrial.

As ligas de alumínio – magnésio pertencem ao grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, dessa forma são endurecidas por soluções sólidas e por encruamento. Nas ligas Al-Mg, após alguns dias em temperatura ambiente, ocorre uma perda de propriedades mecânicas do material deformado a frio. Para contornar esse inconveniente, utiliza-se o tratamento térmico de estabilização, citado anteriormente (ABAL, 2019). A adição do magnésio ao alumínio aumenta a resistência mecânica, além de manter uma excelente ductilidade, resistência à corrosão e aumentar sua soldabilidade. Essas características fazem com que as ligas de alumínio-magnésio sejam usadas em ambientes que exigem razoável resistência mecânica e excelente resistência a corrosão, como, por exemplo, na indústria naval, Figura 2.

Devido à resistência e capacidade de apresentar excelente qualidade de acabamento superficial, como brilho intenso e baixa rugosidade, o uso das ligas da série 5000 é ampliado, principalmente nas regiões de acessórios para automóveis, componentes arquitetônicos e outras aplicações decorativas (INFORMET, 2017).

Figura 2: Área externa do barco Paratii 2.

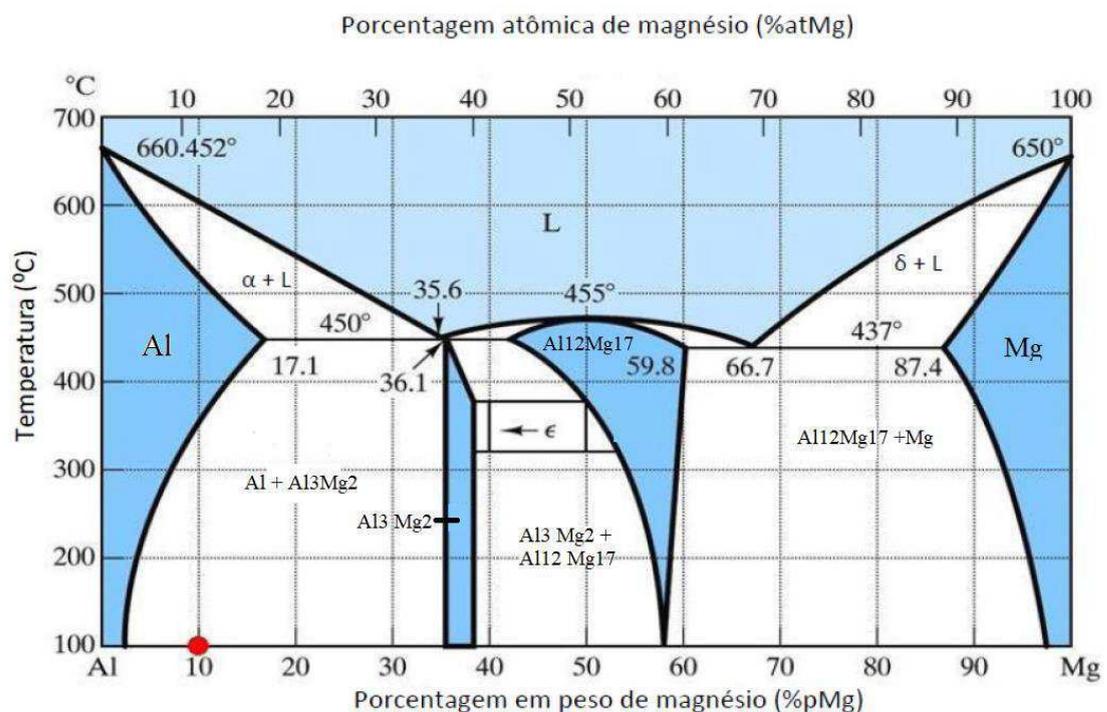


Fonte: Aluauto (2018).

A Figura 3 ilustra o diagrama binário da liga alumínio – magnésio. Embora as ligas de alumínio-magnésio sejam classificadas em não tratáveis termicamente, a quantidade de magnésio solúvel nas temperaturas de recozimento para as ligas Al-Mg, com mais que 4% Mg (como a 5083, 5086, 5056 e 5456), é maior que a retida em solução-sólida na temperatura ambiente. Como resultado, se estas ligas são severamente encruadas e mantidas por um longo tempo a temperatura ambiente, ocorrerá à precipitação de Al_3Mg_2 ao longo das bandas de deslizamento. Se estas ligas são expostas a altas temperaturas em condições de recozimento, a precipitação ocorrerá ao longo dos contornos de grãos. Esta precipitação torna essas ligas suscetíveis à corrosão intergranular em ambiente corrosivo. Por esta razão, o tratamento de estabilização tem sido desenvolvido para aumento da resistência a corrosão (VAN HORN, 1967; MELADO, 2014).

A formação de várias fases de precipitados, que são altamente dependentes da composição química da liga e das condições de processamento térmico, é uma variável particular das ligas de alumínio – magnésio, sendo necessário atenção a estes precipitados, aos seus efeitos e aos seus mecanismos de precipitação (MELADO, 2014).

Figura 3: Diagrama de fase Alumínio – Magnésio.



Fonte: Modificado de Melado (2014).

No Quadro 3 é possível observar a composição química de algumas ligas de alumínio mais utilizadas. Pode-se verificar que as quantidades adicionadas do magnésio na liga variam entre 0,8 a 5,1%. As ligas com teores de magnésio variam entre 3 e 5% são as mais utilizadas na indústria naval, na fabricação de diversos componentes de navios. Também é possível verificar que existem poucas ligas de alumínio – magnésio essencialmente binárias como a 5005, 5050 e 5657, pois a grande maioria possui elementos formadores de dispersóides (partículas dispersas em solução sólida), que pode variar de 0,25 a 1 %.

Quadro 3: Composição química das principais ligas de alumínio – magnésio.

LIGAS DE ALUMÍNIO – MAGNÉSIO					
LIGA AA	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
5005	0,8	-	-	-	Restante
5042	3,5	0,35	-	-	Restante
5050	1,4	-	-	-	Restante
5052	2,5	-	0,25	-	Restante
5252	2,5	-	-	-	Restante
5154	3,5	-	0,25	-	Restante
5454	2,7	0,8	0,12	-	Restante
5654	3,5	-	0,25	0,10	Restante
5456	5,1	0,8	0,12	-	Restante
5457	1,0	0,30	-	-	Restante
5657	0,8	-	-	-	Restante
5082	4,5	-	-	-	Restante
5182	4,5	0,35	-	-	Restante
5083	4,4	0,7	0,15	-	Restante
5086	4,0	0,45	0,15	-	Restante

Fonte: Modificado de Infomet (2017).

2.1.2. LIGA ALUMÍNIO – MAGNÉSIO AA 5083

Dentre as ligas de alumínio- magnésio existentes, pode-se citar a 5083 a mais utilizada devido ao alto grau de resistência à corrosão combinado com um excelente equilíbrio de

propriedades mecânicas (RAO *et al.*, 2013). O Quadro 4 ilustra a composição química nominal da liga AA 5083.

Quadro 4: Composição química nominal da liga de alumínio AA 5083-O.

%	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
Min.	4,00	0,40	0,40	0,10	0,40	0,05	0,25	0,15	0,15	Balanço
Max.	4,90				1,00	0,25				

Fonte: ASTM B 209-14, (2017)

De acordo com o catálogo da CopperMetal (2017), o alumínio AA 5083 apresenta excelente usinagem e estabilidade, com dureza entre 75 e 95 HB e tem grande aplicabilidade nas indústrias. De acordo com o Quadro 4, a liga 5083 contém de 0,45 a 1,25% de adição de cromo e manganês, o que confere melhor resistência à corrosão entre as ligas da série 5000.

Devido à corrosão diferenciada, sobretudo na atmosfera marinha, e baixo peso específico, em torno de 2,80 gf/cm³, sendo 1/3 menor que o aço, as ligas 5083 são amplamente utilizadas no segmento naval e na indústria em geral, que proporciona um desgaste e esforço menor do equipamento (COPPERMETAL, 2017).

A soldagem das ligas de alumínio já foi considerada limitada devido à problemas associados aos processos de união por fusão, tais como remoção de óxido e resistência reduzida na zona de solda e na zona termicamente afetada (GUNGOR *et al.*, 2014). A soldagem da liga 5083 pode ser realizada pelos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). Os processos de soldagem citados, garantem uniões com maior facilidade, além de soldas de maior qualidade para o alumínio e suas ligas. Apesar dos processos serem desenvolvidos na década de 1940 e serem usados em muitas indústrias, ainda há alguns problemas que reduzem a eficiência da junta em torno de 50% (GUNGOR *et al.*, 2014).

2.2. Soldagem

Para construção de equipamentos em geometrias complexas e materiais diversos a soldagem é um processo de fabricação indispensável. Os processos de soldagem têm como grandes vantagens sobre os demais processos de união a simplicidade e economia, já que a

execução de juntas soldadas requer quantidades relativamente pequenas de material (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

A soldagem é definida como 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 (ASM, 2018). Envolve uma série de conhecimentos que são necessários para a sua realização, apesar de ser aparentemente simples, é necessário um planejamento adequado, projeto da estrutura a ser soldada, seleção adequada do tipo de soldagem, escolha de materiais de adição e da ferramenta, procedimentos de inspeção e controle de qualidade.

A soldagem tem uma enorme aplicabilidade, podendo-se citar: construção naval; vasos de pressão; tubulações; equipamentos diversos; serviços de reparo e manutenção, e afeta diretamente na segurança e no custo do projeto, sendo considerado um dos itens principais na realização de projetos.

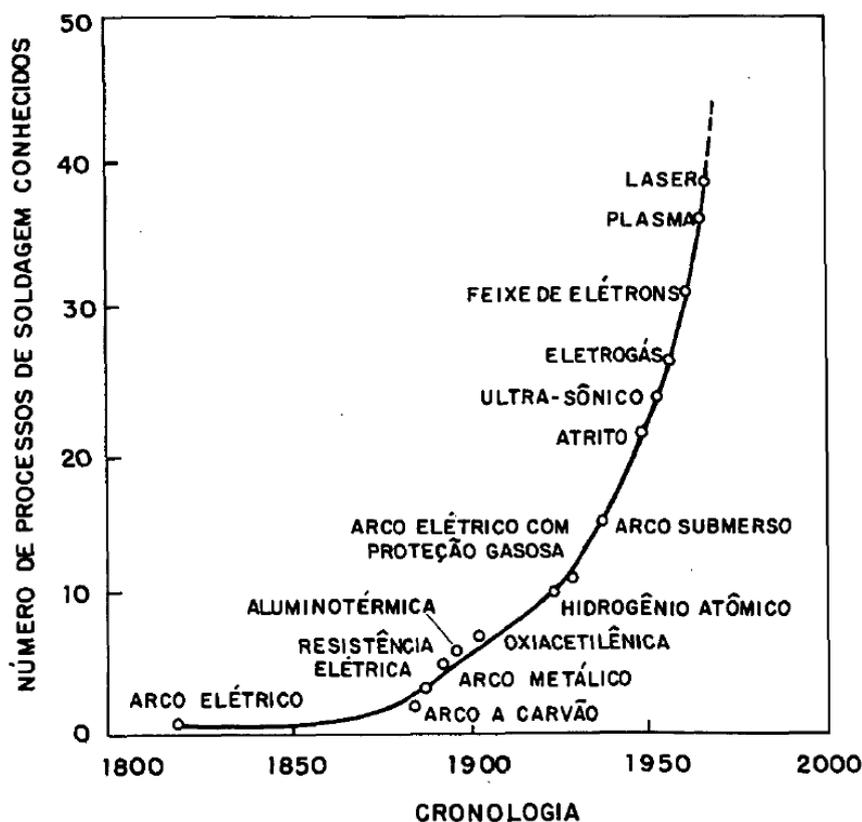
Os métodos de soldagem podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizado na união, na qual têm-se:

- Fonte mecânica: utiliza calor por atrito;
- Ondas de choque: através de deformação plástica;
- Fonte química: por meio de reações químicas exotérmicas;
- Fonte elétrica: ocorre pela passagem de corrente elétrica ou formação de um arco elétrico;
- Fonte radiante: utiliza a radiação eletromagnética.

O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de soldagem estão em contínua evolução devido a modificação e criação de materiais novos, sendo necessário o melhoramento na união de materiais, similares ou não, através de uma quantidade mínima de energia e de geração de defeitos. Na Figura 4 é possível observar a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.

A soldagem teve seu grande impulso durante a Segunda Guerra Mundial, devido a necessidade de fabricação de aviões e navios com maior rapidez e menor custo, e são até hoje utilizados para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, navios, pontes, oleodutos, entre outros (WAINER *et al.*, 1992).

Figura 4: Cronologia dos processos de soldagens.

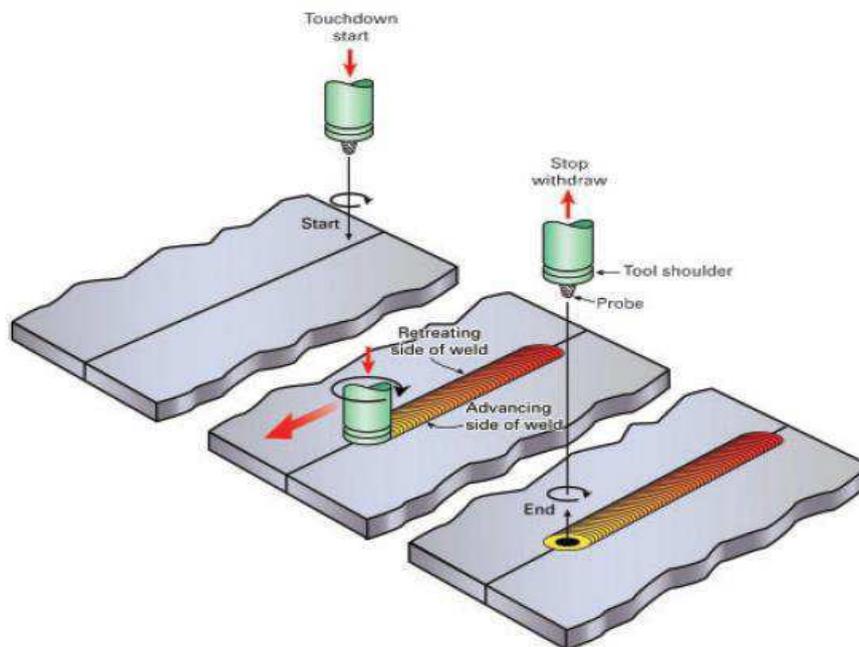


Fonte: Wainer *et al.*, (1992).

2.2.1. FRICTION STIR WELDING (FSW)

Criado pelo *The Welding Institute* (TWI) em 1991, *Friction Stir Welding* é um dos métodos mais eficientes de soldas em materiais de difícil soldabilidade, como alumínio, além de refinamento de microestruturas e de grande potencial para melhorar o comportamento de materiais metálicos deformados através de uma temperatura elevada (GARCÍA-BERNAL *et al.*, 2016). A soldagem por fricção foi desenvolvida principalmente para atender a junção de materiais metálicos considerados de baixa soldabilidade pelos processos convencionais por fusão. Na Figura 5 é possível ver uma ilustração do processo de soldagem FSW.

Figura 5: Ilustração do processo de soldagem FSW.



Fonte: Threadgill, *et al.*, (2009)

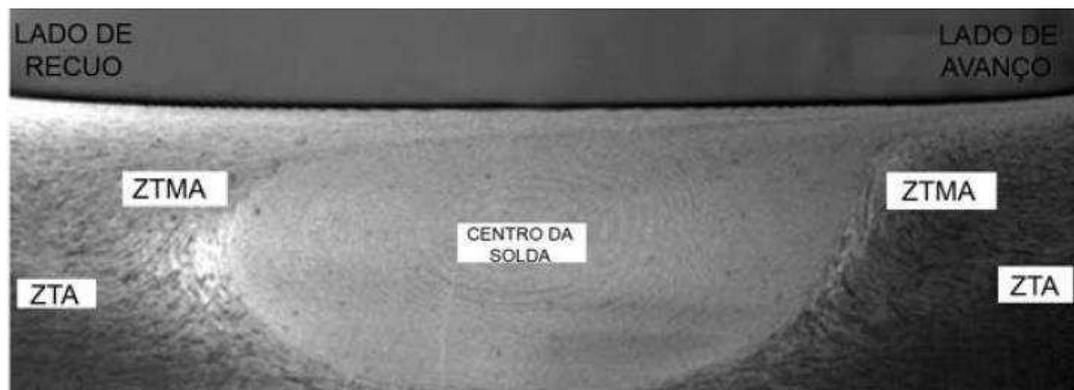
Uma ferramenta, de perfil não consumível, formada por um ombro e um pino, rotaciona entre as placas a serem soldadas, deformando e gerando calor por fricção, desenvolvendo uma região plástica ao redor da ferramenta, chamada de zona misturada (KUMAR *et al.*, 2013). O calor gerado durante a soldagem por FSW é causado principalmente pela pressão da ferramenta sobre o metal de base e a ação do cisalhamento do ombro da ferramenta com as placas.

O pino, que é fixado no ombro e de comprimento menor do que a espessura das placas, é responsável pelo transporte e fluxo do material. Já o ombro, de diâmetro maior do que o pino, é responsável pela maior parte do calor gerado pelo atrito e por conter o material plastificado na região soldada. Pode-se alterar o formato do pino e do ombro da ferramenta, que implica diretamente na modificação da geração de calor e do fluxo de materiais, podendo melhorar as características da junta soldada por este processo.

A junta soldada é considerada assimétrica em relação ao fluxo de materiais que é transportado pela ferramenta e varia de acordo com a posição do material de base em relação a ferramenta rotativa, sendo chamado de lado de avanço, no qual a rotação da ferramenta se move na mesma direção de soldagem e o lado de recuo, no qual a rotação da ferramenta é oposta a direção de soldagem. De acordo com Rao *et al.* (2013) a assimetria da junta soldada é considerada uma característica única do processo FSW.

Após a realização do processo de soldagem e sua solidificação, há a formação da junta soldada, que envolve três regiões de transição do material. A junta soldada corresponde a uma trajetória do metal de base para a zona soldada, como ilustra a Figura 6.

Figura 6: Junta soldada pelo processo FSW de uma liga de alumínio.



Fonte: Fioravanti (2008).

A zona fundida ou zona misturada (ZF ou 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 termomecânica 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.

O processo de soldagem e a geração de calor durante a realização do procedimento tem influência direta na junta soldada e na qualidade da solda, o que interfere nas regiões.

2.2.1.1. Vantagens e desvantagens do processo FSW

O *Friction Stir Welding* possui inúmeras vantagens em relação aos métodos

convencionais por fusão, no qual pode-se citar (ÇAM; MISTIKOGLU, 2014):

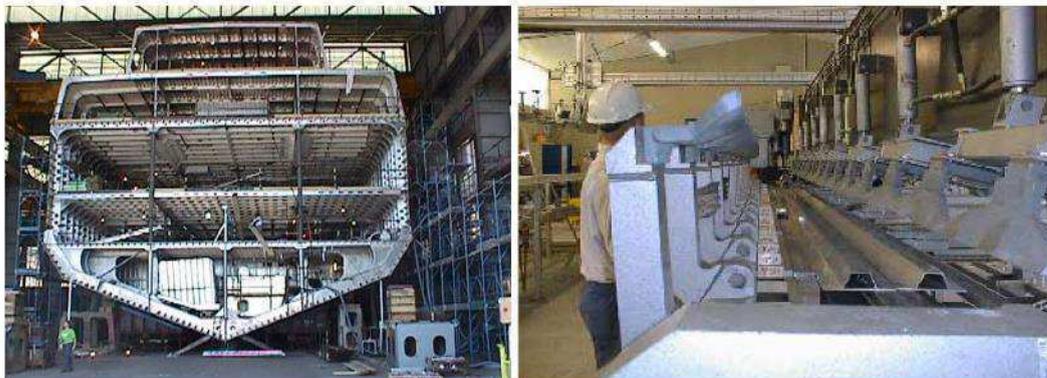
- A entrada de calor durante a soldagem é menor, portanto, a perda nas propriedades mecânicas é menor;
- Distorção e tensões residuais são pequenas, especialmente em chapas finas;
- A preparação da superfície antes da soldagem não é tão crítica, ou seja, filmes de óxidos finos são toleráveis;
- Como é uma soldagem em estado sólido, problemas encontrados em métodos convencionais de soldagem por fusão, como exemplo: formação de porosidade, não são comuns;
- Não há necessidade de metal de adição;
- Após a soldagem não há necessidade de mais tratamento superficial, pois produz superfícies limpas;
- Para soldagem de ligas de alumínio uma mesma ferramenta é capaz de soldar um comprimento equivalente a 1000 metros lineares de soldagem;
- É ecologicamente correto, pois não há emissão de gás, poeira ou arco;
- É muito adequado para aplicações de automação e robótica.

As desvantagens são:

- As placas a serem soldadas devem ser fixadas com firmeza;
- Máquinas específicas são necessárias para unir placas mais grossas.

Por possuir um menor custo e ser fácil de realizar, o processo não necessita de técnicos específicos para realização das juntas, sendo aplicadas em soldagem de ligas de alumínio para indústria aeroespacial, automotiva e indústrias de construção de navios (KUMAR *et al.*, 2013). Na Figura 7 é possível observar a aplicabilidade do processo FSW na construção naval.

Figura 7: Aplicabilidade da soldagem FSW na construção naval.



Fonte: Modificado de Çam; Mistikoglu, (2014).

2.2.1.2. Parâmetros de soldagem por FSW

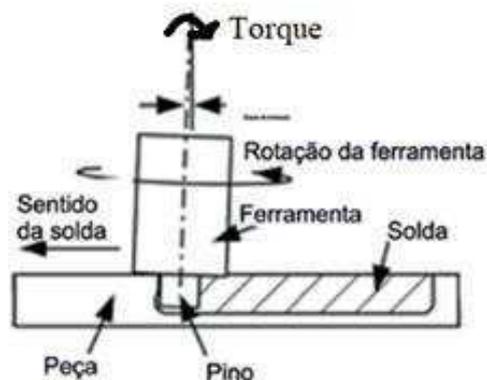
O processo de soldagem por FSW pode ser realizado por máquinas específicas ou uma fresadora adaptada, na qual é possível estabelecer os parâmetros de soldagem adequados, que influencia diretamente na solda e na vida útil da peça. Os principais parâmetros de processo utilizados para a soldagem por fricção são: velocidade de avanço da ferramenta; velocidade de rotação da ferramenta e ângulo de inclinação da ferramenta. Existem outros parâmetros, como por exemplo a força vertical; sentido de rotação da ferramenta e penetração da ferramenta na peça a ser soldada, que também influenciam na qualidade da solda, porém esses itens não serão abordados nessa dissertação.

- Velocidade de avanço: é caracterizada pela distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo, geralmente sendo fornecida em milímetros por segundo. De acordo com Oliviecki e Beskow (2013) a velocidade de avanço da ferramenta tem ligação inversamente proporcional com a geração de calor durante o processo, sendo assim, baixas velocidades de soldagem favorecem uma maior geração de calor e, por consequência, temperaturas mais elevadas.
- Velocidade de rotação: é o quanto a ferramenta rotaciona em torno do seu eixo para favorecer a mistura mecânica das peças a serem soldadas. É medida em relação ao número de rotações por minuto. Mishra e Ma (2005) concluíram que 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. A velocidade de rotação é diretamente ligada à geração de calor durante a soldagem e 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 (OLIVIECKI; BESKOW, 2013). Como fator principal para otimização dos parâmetros de soldagem, a razão entre velocidade de rotação e velocidade de avanço estabelecem dados confiáveis para soldas com qualidades.

- **Ângulo de inclinação:** é um dos principais fatores para uniões de chapas por *Friction Stir Welding* e é determinado pela inclinação do pino da ferramenta com as peças a serem soldadas, conforme ilustra a Figura 8. Fornecendo uma maior pressão no local da soldagem, o ângulo de inclinação na direção da solda melhora as condições de soldagem devido à maior movimentação de fluxo de materiais da frente para trás do pino e da maior consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo (SEGATTI, 2011).

Figura 8: Ângulo de inclinação da ferramenta de soldagem por FSW.

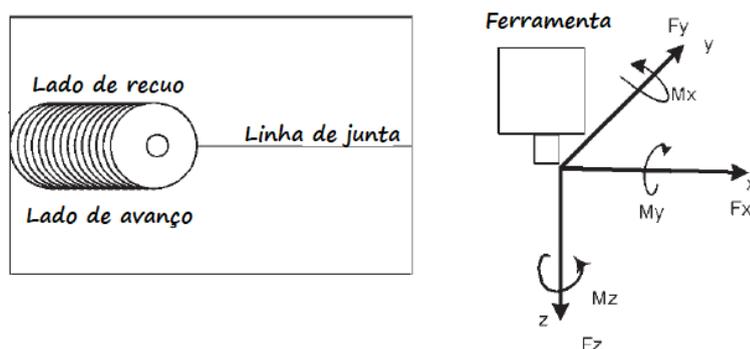


Fonte: Modificado de Cerveira, (2008).

A temperatura máxima aumenta significativamente com o aumento velocidade de rotação da ferramenta e diminui ligeiramente com o aumento velocidade de avanço. Velocidades de avanço mais altas podem causar força excessiva da direção de soldagem, que por sua vez pode levar ao desgaste da ferramenta e, em casos extremos, quebra da mesma (ÇAM; MISTIKOGLU, 2014).

As forças que agem sobre a ferramenta variam com os parâmetros de processo. Na Figura 9 é possível observar as três forças principais exercidas sobre a ferramenta. A força x age na superfície do pino normal à direção de soldagem, a força y é a horizontal que age ao longo da direção transversal e é perpendicular a força x e, por fim, a força z é a vertical que age na base da superfície do pino. Em qualquer instante durante a soldagem, as forças são transmitidas do pino para o material que flui ao redor dele (BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2009).

Figura 9: Representação esquemática do processo FSW e das forças que atuam sobre a ferramenta.



Fonte: Modificado de BALASUBRAMANIAN, *et al*, 2009.

2.2.1.3. Geração de calor

A soldagem por fricção envolve interações complexas entre uma variedade de processos termodinâmicos simultâneos que afetam as taxas de aquecimento e resfriamento, deformação plástica e vazão, e recristalização dinâmica e a integridade mecânica da junta (SU *et al.*, 2003). A geração de calor é causada pelo atrito entre a ferramenta e a peça a ser soldada resultando em uma deformação plástica na região soldada.

De acordo com Çam e Mistikoglu (2014) o calor gerado dentro da zona agitada é determinado por dois fatores: velocidade rotacional da ferramenta e velocidade de avanço. A geometria da ferramenta desempenha um papel importante e é o terceiro fator que afeta o calor gerado dentro da zona misturada.

Já Nandan *et al* (2008) afirma que a geração de calor é o produto da força de atrito e da velocidade de deslizamento e é influenciada pela velocidade de rotação, mas não pela velocidade de soldagem. A medida que a peça de trabalho é aquecida, o amolecimento

localizado reduz o atrito e, como consequência, a taxa de geração de calor (NANDAN *et al.*, 2008).

No processo de soldagem FSW, a ferramenta se move ao longo da junta a uma velocidade constante U , e gira em torno de seu eixo com velocidade ω . Em qualquer ponto da interface ferramenta - peça de trabalho, a velocidade tangencial da ferramenta em relação a peça de trabalho é dada por $Vr = \omega r - U \sin \theta$, onde r é a distância radial do eixo da ferramenta e θ é o ângulo entre o vetor radial, r , e a direção da soldagem. A taxa de geração de calor local devido ao atrito é dada pela equação (MCCLURE *et al.*, 1998):

$$d\dot{e}_f = \delta(\omega r - U \sin \theta) \mu_f p dA$$

Onde δ é a extensão do escorregamento, μ_f é o coeficiente de atrito e p é a pressão local aplicada pela ferramenta na área elementar dA .

2.2.1.4. Fluxo de materiais e mecanismo de união

Fluxo de materiais é o movimento constante do material plastificado na região soldada que é transportado da frente do pino para trás da ferramenta. Existem três tipos de fluxo que afetam o transporte de materiais plastificados durante o processo de soldagem por fricção e a interação simultânea destes três efeitos resulta no movimento global do material plastificado (NANDAN *et al.*, 2008). São eles:

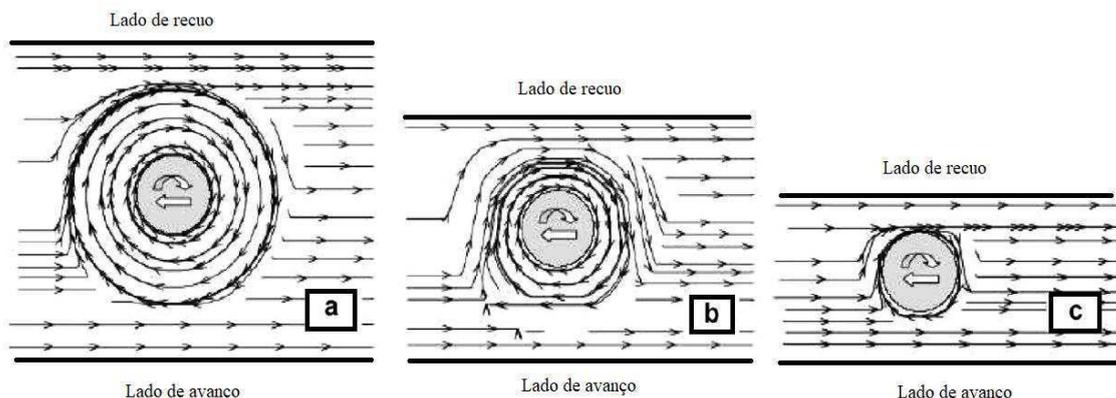
- Fluxo ao redor da ferramenta: que é impulsionado pela rotação da ferramenta e o atrito da ferramenta e peça soldada;
- Movimento do pino: tende a empurrar o material para baixo, o que impulsiona um movimento ascendente de material plastificado;
- Fluxo ocasionado pelo movimento relativo entre ferramenta e a peça.

Através da ilustração da Figura 10, pode-se observar as linhas de fluxo que indicam a presença da zona de rotação, mostrando o fluxo de recirculação do material ao redor do pino de ferramenta. A espessura do material de recirculação na região de fluxo é afetada por propriedades do material, parâmetros de soldagem e taxa de transferência de calor da

ferramenta. Esta zona ocupa áreas maiores em planos de maior altitude devido ao maior transporte de momento do ombro rotativo (NANDAN *et al.*, 2008).

Nota-se que as linhas de fluxo indicam que além da região de recirculação de fluxo plástico, isto é, na zona de transição, a transferência de material ocorre principalmente no lado de recuo. Também é possível observar uma inversão de fluxo no lado de avanço, próximo ao pino, levando a uma zona relativamente estagnada. De acordo com Nandan *et al.* (2008) uma consequência para essa estagnação de fluxo no lado de avanço é defeitos do tipo “buraco de minhoca”. Também é possível observar pela ilustração que o fluxo de material ocorre de forma mais uniforme no lado de recuo da ferramenta.

Figura 10: Traços de fluxo em diferentes planos horizontais (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm e (c) 2,28 mm abaixo da superfície superior por uma chapa de aço inoxidável de espessura 3,18 mm.



Fonte: Modificado de Nandan *et al.*, (2006).

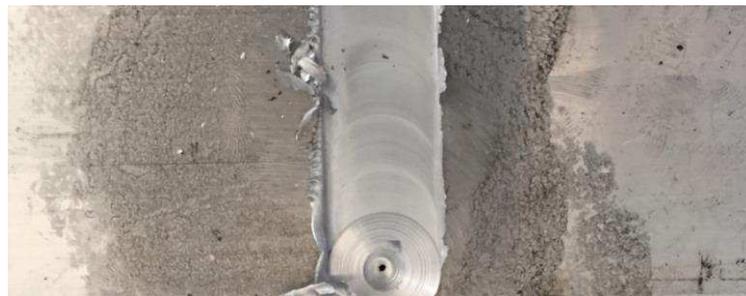
2.2.1.5. Defeitos causados pela soldagem por FSW

Os defeitos gerados pela soldagem por FSW mais comuns são defeitos superficiais, porosidade e o “buraco de minhoca” que podem ser ocasionados devido aos parâmetros inadequados das variáveis de soldagem. Como defeito superficial tem-se o excesso de rebarba, ocasionado devido a heterogeneidade significativa na geração de calor na interface ombro e peça, movido pelo superaquecimento na superfície (CRAWFORD *et al.*, 2006). A Figura 11

ilustra o defeito superficial de excesso de rebarba.

O projeto de ferramentas e as variáveis de soldagem afetam os padrões do fluxo dos materiais, como foi visto por Elangovan e Balasubramanian, (2007). Porém nenhum caráter específico do fluxo de material foi relacionado com a formação de porosidade, não existindo nenhum mecanismo unificado de formação da porosidade. Em relação ao defeito de “buraco de minhoca”, 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.

Figura 11: Defeito superficial do tipo excesso de rebarba de uma chapa de alumínio soldada pelo processo FSW.



Fonte: autoria própria.

A propensão para falhas e vazios aumenta com a velocidade de soldagem, embora exista uma dependência do material a ser soldado (LEAL; LOUREIRO, 2004). Os defeitos tendem a aparecer no lado de avanço, pois é nessa região que ocorre uma transição microestrutural abrupta da zona misturada para a zona termomecânica afetada. Já no lado de recuo, a transição ocorre de maneira gradual, fazendo com que essa região seja menos propensa a defeitos.

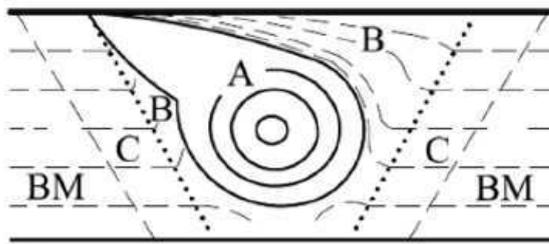
A variável ângulo de inclinação da ferramenta, quando superior a 1° , influi diretamente na taxa de geração de calor, podendo ocasionar a formação de precipitados que podem diminuir a dureza da junta, dependendo de sua natureza.

2.2.1.6. Propriedades e microestruturas da soldagem de ligas de alumínio pelo processo FSW

A soldagem de ligas de alumínio pelo processo de FSW ocasiona modificações

microestruturais nas juntas soldadas, principalmente na região da zona misturada, onde ocorre uma recristalização e refinamento dos grãos, aumentando a resistência mecânica e a dureza. Porém o tipo de liga de alumínio utilizada interfere nas propriedades obtidas. A macroestrutura típica observada em juntas soldadas por fricção é esquematicamente ilustrada na Figura 12.

Figura 12: Microestrutura típica da soldagem FSW.



Fonte: Çam, G & Mistikoglu, S; 2014.

Através da Figura é possível observar a área de solda, que consiste em três zonas distintas: A- zona misturada (ZM), também chamada de zona dinamicamente recristalizada, B- zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e C- zona termicamente afetada (ZTA). Esta área de solda de três zonas é tipicamente observada em materiais com baixas taxas de recristalização, tais como ligas de alumínio.

Muitas ligas de alumínio possuem alta resistência devido ao endurecimento por precipitação através do envelhecimento (natural ou artificial). Porém, o calor gerado ocasiona uma queda de dureza à medida que a temperatura aumenta. De acordo com Sato *et al.*, (1999) isso ocorre porque os precipitados irão crescer e reduzir a densidade numérica em regiões distantes da fonte de calor e entrará novamente em solução quando o pico de temperatura for suficientemente alto. Já as ligas não endurecíveis por precipitação, esse fenômeno de solubilização dos precipitados não ocorre, resultando em uma dureza constante em toda a região soldada.

Foi evidenciado por Colegrove & Shercliff (2004) que a manipulação dos parâmetros de soldagem do FSW e dos perfis de ferramenta, ou seja, a alteração das geometrias do pino e do ombro, podem ajudar a melhorar as propriedades mecânicas da junta soldada. Isso ocorre devido a uma alteração no fluxo de material e na geração de calor durante o processo de soldagem.

2.3. Tensões residuais

Tensões residuais são definidas como tensões existentes em um material sob condições de temperaturas uniformes e sem a ação de carregamentos externos (CINDRA, 2000), ou seja, é o estado de tensões no material sem que nele estejam aplicadas forças externas ou outras fontes de tensões. Esses estados de tensões tendem a se equilibrar mutuamente, pois o somatório das forças e dos momentos é igual a zero, num dado volume de material.

Quando uma região do material se deforma elasticamente ou plasticamente de modo não homogêneo, há o surgimento das tensões residuais, fazendo com que ocorra incompatibilidades no estado de deformação (LIMA, 2013). Quando as tensões residuais se somam as tensões aplicadas externamente no material, pode ocorrer o aumento ou diminuição da vida útil do material, dependendo do tipo da tensão gerada.

Em muitos casos, onde as falhas levaram a um rompimento precoce do material, existiam tensões residuais no componente que se somaram aos esforços externos aplicados, porém, dependendo da natureza, o rompimento pode ser retardado (WHITERS; BHADSHIA, 2001). De acordo com Cindra (2000) as tensões residuais podem ser classificadas quanto a área de abrangência, sendo:

- Tensões residuais macroscópicas (tipo 1): são tensões aproximadamente uniformes ao longo de áreas extensas, ou seja, envolvendo vários grãos. Ocorrem em materiais deformados plasticamente de maneira não uniforme, como exemplo no processo de laminação ou gradientes térmicos.
- Tensões residuais microscópicas (tipo 2): são tensões que mantêm uma distribuição uniforme ao longo de um grão ou de boa parte dele. Podem ocorrer em interfaces entre fases e partículas precipitadas e a matriz.
- Tensões residuais submicroscópicas (tipo 3): são tensões que abrangem distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina como vazios e impurezas.

Pode-se dizer que as tensões residuais aparecem através de uma resposta elástica do material quando ocorre uma distribuição não homogênea de deformações não elásticas. Essas deformações podem ser plásticas, através de precipitações, transformação de fase, devido à expansão térmica, entre outros.

2.3.1. TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é caracterizada como um dos principais processos de fabricação que gera tensões residuais, na qual afeta o comportamento do material de sustentar as cargas aplicadas, 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.

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

Pode-se ocorrer durante o processo de soldagem as tensões residuais trativas, que se somam às tensões externas levando rompimento prematuro do material, e as tensões compressivas, que se somam as tensões externas, porém alivia as tensões, melhorando a vida útil da peça. É necessário então o estudo das tensões residuais tanto para avaliar a durabilidade da peça, como também melhorar suas condições de uso.

Basicamente, existem três principais fontes de tensões residuais durante o processo de soldagem, são elas (CINDRA, 2000):

- Contração durante o resfriamento: as temperaturas presentes no processo são de tal magnitude que quando ocorre o resfriamento, o material recupera sua rigidez e se contrai sob temperaturas ainda elevadas e em condições heterogêneas, surgindo as tensões.
- Resfriamento intenso na superfície da peça soldada: o processo de resfriamento não é homogêneo ao longo da espessura da chapa, e na região da superfície o resfriamento ocorre de maneira mais rápida que no interior da peça, surgindo as tensões.
- Transformações de fases: Regiões da zona misturada e da zona termicamente afetada tendem a se expandir, porém essa expansão é impedida pelas regiões adjacentes do material, que se encontram a temperaturas inferiores. Esse impedimento da expansão gera as tensões residuais.

A soldagem por FSW possui uma característica que difere das soldagens convencionais por fusão: a tensão adicional causada pelos componentes de rotação e translação da ferramenta, de forma que os parâmetros de soldagem afetem o estado final de tensões (CHEN;

KOVACEVIC, 2006). A plasticidade durante o processo de fricção é um importante fator que é considerado durante os cálculos das tensões residuais. Mesmo considerando o estado de tensões residuais menores no cenário da soldagem por FSW do que nos processos convencionais por fusão, eles ainda interferem diretamente nas taxas de propagação de trincas.

2.3.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

A medição de tensões residuais não pode ser realizada pelos procedimentos tradicionais de análise experimental de tensões, já que, na prática, as tensões residuais não são medidas diretamente, em vez disso, são obtidas através da medição da deformação ou através de grandezas secundárias, tais como a velocidade ultrassônica ou ruído magnético (WITHERS; BHADESHIA, 2001).

Os métodos de medição de tensões residuais podem ser: físicos ou mecânicos (MELADO, 2014). Nos métodos mecânicos, o material sofre alguma deformação para poder comparar o estado de tensão antes e depois da deformação, ou seja, é considerado um método destrutivo. Nesse tipo de método, a medição por furo cego é a mais conhecida, no qual o material é furado e o estado de tensões antes e depois do furo é comparado.

No método de medição físico, os materiais não sofrem alterações, sendo considerado um método não destrutivo, ou seja, a medição é realizada sem o relaxamento do material. Pode-se citar como método não destrutivo a medição por difração de raio X ou difração de nêutrons.

2.3.2.1. Medição de tensões residuais utilizando a mesa de coordenadas

A medição de tensões residuais pelos métodos convencionais físicos é complexa devido a dificuldade de obtenção de resultados confiáveis. Para solucionar esse problema, surgiu as máquinas de medir por coordenadas (MMC), que possuem diversas vantagens como: flexibilidade, alta velocidade de medição, baixo nível de incertezas, grande aplicabilidade e medições de peças complexas (SIQUEIRA FILHO, 2012).

A medição por coordenadas possui o princípio que envolve aquisição das coordenadas de pontos sobre a peça, onde serão realizados as medições e um futuro processamento matemático

(SIQUEIRA FILHO, 2012). É considerado um método destrutivo, já que se baseia na medição das tensões antes e depois da realização de furos.

Com base nos sistemas de medição de deslocamento das máquinas, é possível conhecer a posição que um elemento localizador ocupa dentro do espaço de trabalho da máquina. Este localizador, operando por princípios eletromecânico e articulado, é chamado de apalpador, ou seja, ele relaciona o ponto de contato do seu sensor com a peça a um ponto de referência conhecido dentro do sistema coordenado, como ilustra a Figura 13.

Figura 13: Sistema de medição por mesa de coordenadas.



Fonte: autoria própria.

2.4. Planejamento experimental

O planejamento experimental é uma técnica que foi proposta e desenvolvida na década de cinquenta por Box *et al.*, (1978) para otimizar processos, reduzir custos e tempo. Fundamentado na teoria da estatística, o planejamento experimental minimiza as técnicas de tentativa e erro, quando utilizado de forma eficiente.

Apesar de abordar a teoria da estatística, a ferramenta de planejamento experimental depende mais da competência do profissional em sua área de atuação que de seus conhecimentos em estatística, sendo necessário um conhecimento adequado para aplicar a metodologia de forma eficiente.

Esta técnica é utilizada para diversos fins, podendo-se citar: a determinação, otimização e quantificação da influência das variáveis sobre as respostas desejadas, obtendo-se assim respostas confiáveis; obtenção de informações sobre a robustez das respostas; aprimoração de metodologias analíticas e otimização do rendimento de processos (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

2.4.1. VANTAGENS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

De acordo com Rodrigues e Iemma (2009) as principais vantagens da utilização da metodologia de planejamento de experimentos são:

- Reduzir o número de experimentos ou repetições e melhorar a qualidade da informação obtida através dos resultados, reduzindo o trabalho, custo e tempo;
- Os fatores são analisados simultaneamente, podendo assim verificar e quantificar os efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse. Caso fosse analisado separadamente cada um dos fatores, não se atingiria a condição de otimização, pois não seria possível detectar a interação entre os fatores;
- É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo, sendo considerada uma das grandes vantagens do planejamento;
- Permite calcular e avaliar o erro experimental, sendo fundamental para que se possa especificar o nível de confiança estatística com o qual pode estimar a reprodutibilidade do resultado desejado.
- Depende mais da competência do profissional em sua área de atuação que de seus conhecimentos em estatística, ou seja, com uma base mínima necessária e com as técnicas específicas, um pesquisador conscientemente poderá desenvolver seus planejamentos com sucesso.

A necessidade da otimização de processos, minimizando custos e tempo, maximizando

rendimento, produtividade e qualidade, tem levado profissionais de diferentes formações a buscarem a metodologia de planejamento de experimentos, já que a mesma é considerada adequada para diversas aplicabilidades.

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.

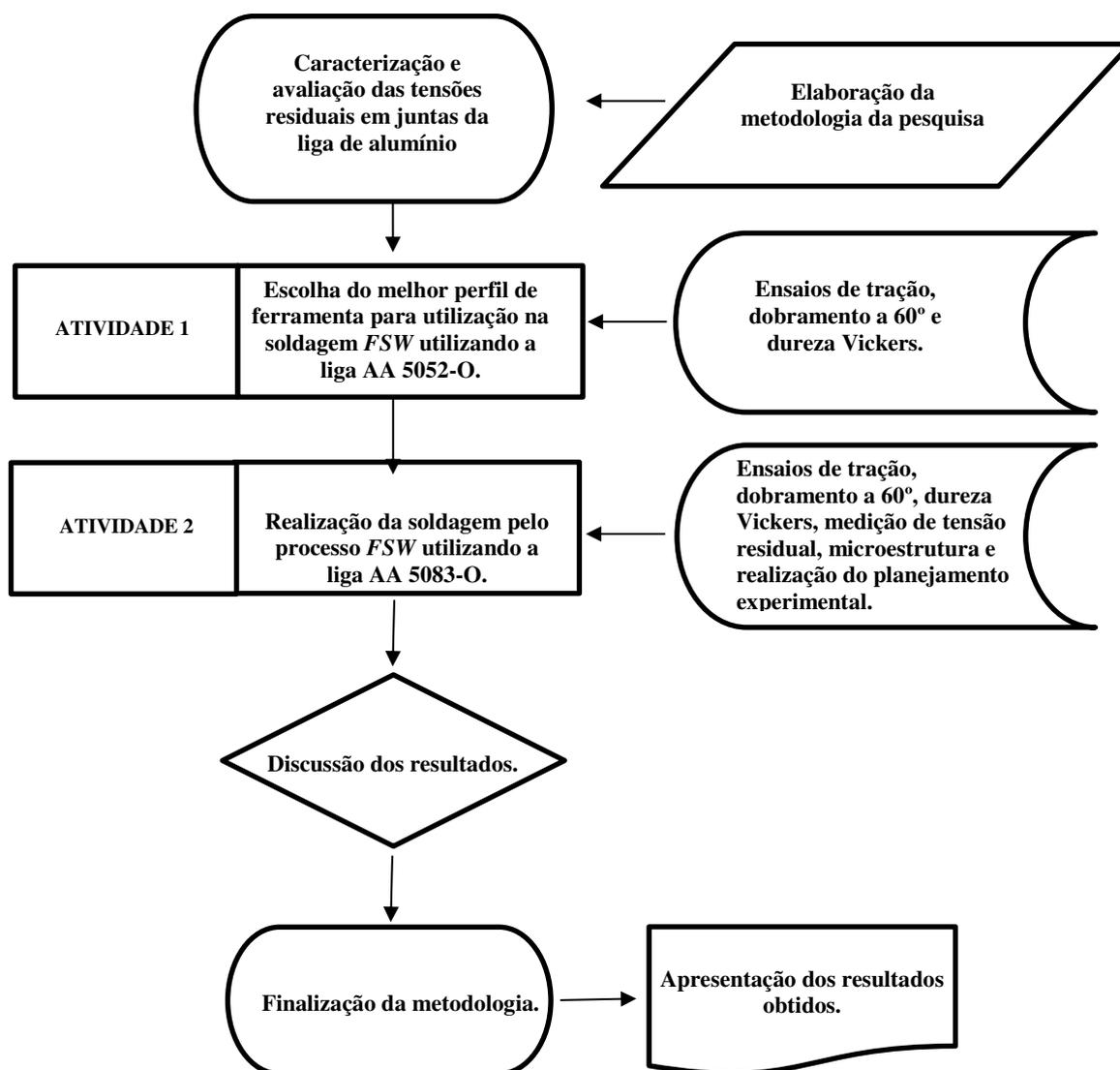
3.1. Caracterização da pesquisa

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 14, foi proposto inicialmente a escolha da ferramenta padrão para a soldagens realizadas pelo processo FSW. Para tanto, foram utilizados doze perfis de geometrias de pinos. Foram soldadas doze chapas, com réplicas, da liga de alumínio AA 5052-O para cada geometria de pino, com parâmetros fixos, e realizado ensaios de tração uniaxial, dobramento a 60° e dureza Vickers, com a finalidade de identificar o perfil de pino da ferramenta que promoverá a obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias.

Logo após a escolha da ferramenta, foram conduzidas as soldagens pelo processo FSW nas chapas de liga de alumínio 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 14: Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.



Fonte: autoria própria.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram duas ligas de alumínio da série 5000, nas quais o principal elemento de adição é o magnésio, que confere a liga maior resistência à corrosão e resistência mecânica. A liga AA 5052-O foi utilizada para a realização das soldagens FSW com diferentes perfis de ferramenta, com o intuito da escolha do melhor perfil, e devido a sua maior disponibilidade no mercado local e menor custo que a liga AA 5083-O. Já a liga AA 5083-O, liga de estudo dessa pesquisa, foi utilizada para a realização das soldagens pelo processo FSW, bem como a caracterização e análise das juntas soldadas.

Foram utilizados chapas da liga AA 5052-O e AA 5083-O com 4,76 mm de espessura. Os Quadros 5 e 6 ilustram a composição química nominal das ligas.

Quadro 5: Composição da liga AA 5052-O.

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Outros	Al
2,2	0,25	0,4	0,1	0,1	0,15	0,1	0,15	Balanço

Fonte: ASTM B209-14, (2017).

Quadro 6: Composição da liga AA 5083-O.

Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Si	Ti	Outros	Al
4,0	0,4	0,1	0,4	0,05	0,25	0,4	0,02	0,15	Balanço

Fonte: ASTM B209-14, (2017).

3.3. Processos de soldagem

3.3.1. ESCOLHA DO PERFIL DE FERRAMENTA

A fim de averiguar a influência da geometria do pino da ferramenta na resistência mecânica, foram fabricados doze perfis de ferramentas diferentes, como pode ser observado na Figura 15. Segundo Capelari (2003), a geometria da ferramenta é o aspecto mais influente no decorrer do processo de soldagem por FSW, pois é encarregado de promover aquecimento e escoamento adequado do material ao redor do pino. No Quadro 7 é possível observar todos os perfis de ferramentas separadamente.

As ferramentas foram usinadas em aço ao carbono ABNT 1020, submetidas 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.

Após a fabricação das ferramentas, foram confeccionadas as juntas soldadas por FSW. utilizando uma fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat, conforme ilustra a Figura 16, localizada no laboratório de máquinas operatrizes, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), campus Cajazeiras. Os parâmetros de soldagem foram fixados com o intuito de avaliar apenas a influência da geometria do pino da ferramenta de soldagem sobre as propriedades mecânicas. A inclinação da ferramenta de soldagem foi mantida em 2°, a rotação utilizada foi de 1750 RPM e a velocidade de soldagem foi de 118

mm/min, determinados após longa avaliação exploratória, através de tentativas e erros, dos parâmetros. A Figura 17 ilustra as dimensões das chapas utilizadas.

Figura 15: Ferramentas de soldagem confeccionadas em 12 perfis diferentes de pinos.



Fonte: autoria própria.

Figura 16: Fresadora universal automática modelo FU-300 da Diplomat.



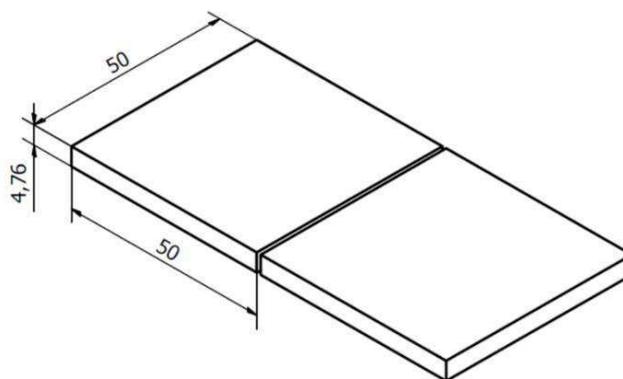
Fonte: autoria própria.

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: autoria própria.

Figura 17: Esquema da junta de topo empregada neste trabalho.



Fonte: autoria própria.

3.3.2. EXECUÇÃO DAS SOLDAGENS COM A LIGA AA 5083-O

Após as soldagens nas chapas de alumínio AA 5052-O para a escolha do melhor perfil geométrico da ferramenta, foram realizadas as soldagens das ligas de alumínio AA 5083-O com a geometria do pino da ferramenta 4 (rosqueado cilíndrico de ponta arredondada). Para este procedimento, foi adotado um planejamento experimental fatorial $2^3 + 3$ pontos centrais para a determinação, otimização e quantificação da influência das variáveis sobre as respostas desejadas, obtendo-se assim respostas confiáveis.

Os Quadros 8 e 9 ilustram, respectivamente, os níveis escolhidos e o planejamento experimental adotado nesse ensaio. Os níveis escolhidos para o planejamento foram obtidos através de pesquisas feitas na literatura.

Quadro 8: Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.

Parâmetros	Nível -1	Ponto central 0	Nível +1
Velocidade de avanço (mm/min)	70	125	180
Velocidade de rotação (RPM)	340	760	1180
Inclinação da ferramenta (°)	1	2	3

Fonte: autoria própria.

Foram adotados como respostas os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT), deformação de fratura (DEF) obtidos através do ensaio de tração uniaxial, a carga suportada obtida pelo ensaio de dobramento de raiz a 60°, os perfis de dureza e as tensões residuais. As respostas foram implementadas em um *software* de análises estatísticas que verifica a influência das respostas sobre as variáveis estabelecidas e suas interações.

Quadro 9: Planejamento experimental fatorial $2^3 + 3$ pontos centrais para FSW.

Ensaio	Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade de rotação (RPM)	Inclinação da Ferramenta (°)
1	70	340	1
2	180	340	1
3	70	1180	1
4	180	1180	1
5	70	340	3
6	180	340	3
7	70	1180	3
8	180	1180	3
9	125	760	2
10	125	760	2
11	125	760	2

Fonte: autoria própria.

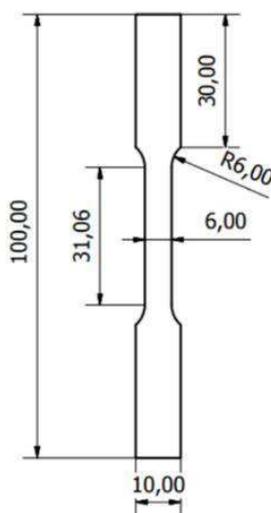
3.4. Metodologia de ensaios

3.4.1. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Foram realizados ensaios de tração uniaxial para cada uma das juntas utilizando diferentes parâmetros de soldagem. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios da Instron, modelo 5582, localizada no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LAMMEA) da unidade acadêmica de engenharia mecânica (UAEM) da UFCG. Para os mesmos, foi adotado uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ruptura dos corpos de

prova. A Figura 18 ilustra o corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

Figura 18: Corpo de prova para o ensaio de tração seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

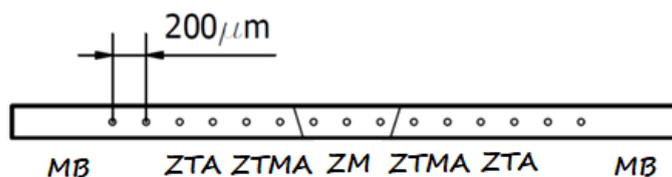


Fonte: autoria própria.

3.4.2. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS

Com o objetivo de verificar a dureza nas regiões soldadas e compará-las com a do metal de base, foi realizado o ensaio de dureza Vickers, para cada condição de soldagem, utilizando um microendentador e aplicando-se uma carga de 10 gramasforça (gf), por 15 segundos, com espaçamento entre as impressões de 200 μm , conforme ilustra a Figura 19. Em cada amostra foram realizadas, em média, 100 medições de dureza Vickers (HV) ao longo de uma linha horizontal transversal ao cordão de solda utilizando um microdurômetro digital FM-700 da FutureTech.

Figura 19: Posição onde foram realizadas as impressões de dureza.



Fonte: autoria própria.

3.4.3. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°

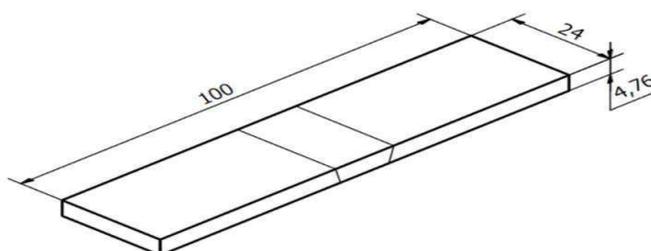
O ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60° foi realizado com o intuito de verificação da qualidade da solda. Foram realizados dois ensaios para cada junta soldada obtida de cada parâmetro citados anteriormente. O ensaio foi realizado na máquina de ensaio universal MTS, modelo 810, existente no laboratório de ensaios da UAEM da UFCG, conforme ilustra a Figura 20, seguindo a norma ASTM E190-92, adotando uma taxa de deslocamento de 10mm/min. A Figura 21 ilustra o corpo de prova utilizado no ensaio.

Figura 20: Máquina de ensaio universal MTS, modelo 810.



Fonte: autoria própria.

Figura 21: Corpo de prova para o ensaio de dobramento de raiz a 60°.



Fonte: autoria própria.

3.4.4. ENSAIO PARA MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS

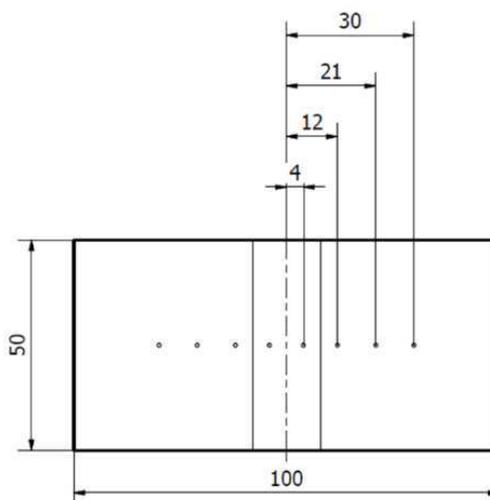
Para determinar a magnitude das tensões residuais nas juntas soldadas empregou-se uma variação da técnica semi-destrutiva do furo cego, que consiste em utilizar uma máquina de medição de coordenadas e determinar a variação das coordenadas pré-determinadas para o centro de um furo após a realização deste. Esta técnica foi empregada na literatura por Siqueira Filho *et al* (2012) e espera que se obtenha variações das coordenadas em função da relaxação das tensões residuais de soldagem. Para tanto, são empregadas as equações 1 e 2:

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

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

As coordenadas de referência foram determinadas em um programa CNC, em código FANUC, e os furos foram realizados utilizando-se um centro de usinagem D-600 da Romi. A Figura 22 ilustra como as furações foram realizadas. 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 , como ilustra a Figura 13.

Figura 22: Esquema da furação para aferição da tensão residual (dimensões em milímetros).



Fonte: autoria própria.

3.4.5. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para análise da microestrutura foi utilizado um microscópio modelo BX-51 da Olympus. A preparação da amostra seguiu, primeiramente, os procedimentos padrões de metalografia com lixamento em lixas de granulometria 400, 600, 1200, 1500 e 2000. Logo após, foi realizado o polimento eletrolítico utilizando o maquinário da marca Struers, modelo LectroPol – 5 localizado na UAEM – UFCG, conforme ilustra a Figura 23. Para revelar a microestrutura, foi utilizado um ataque químico com o reagente Keller.

Figura 23: Aparelho utilizado no polimento eletrolítico.



Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos através da metodologia proposta no capítulo anterior, buscando alcançar o objetivo geral estabelecido para a pesquisa. O capítulo divide-se em escolha do perfil da ferramenta, no qual foi determinado a melhor geometria de pino para a realização das soldagens por FSW e caracterização das juntas soldadas por FSW, informando as propriedades obtidas através dos ensaios realizados e a microestrutura do material soldado. Logo após, foi feita a realização de um planejamento experimental fatorial com o intuito da verificação da influência dos parâmetros de soldagem por FSW sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas da liga AA 5083-O.

4.1. Escolha do perfil de ferramenta

4.1.1. INSPEÇÃO VISUAL

Inicialmente, foram realizadas inspeções visuais em todas as doze juntas soldadas com os diferentes perfis a fim de verificar a ocorrência de defeitos superficiais na solda, que incluem: falta de penetração, túneis (buraco de minhoca), trincas, furo remanescente (*keyhole*) e excesso de rebarba (*flash*), já que esses defeitos podem influenciar nos resultados dos ensaios mecânicos posteriores. O Quadro 10 ilustra os defeitos que podem ser visualizados na soldagem pelo processo FSW.

A Figura 24 ilustra uma placa soldada com dimensionamento da largura da solda e o Quadro 11 das doze chapas soldadas por diferentes perfis de ferramenta. Foram visualizados, nas juntas soldadas das ferramentas 1, 7, 9 e 11, o furo remanescente (*keyhole*), que é considerado um defeito específico do processo de soldagem por FSW, já que o mesmo é originado pelo pino da ferramenta e pelo excesso de força uniaxial exercida durante o processo. O *keyhole* é proveniente do pino e ocorre necessariamente no fim do processo FSW, quando a ferramenta é recolhida.

Quadro 10: Defeitos encontrados na soldagem pelo processo FSW.

Defeito	Imagem	Referência
Falta de penetração		Autoria própria
Túnel (buraco de minhoca)		Prabhu, S. <i>et al.</i> 2017
Furo remanescente (<i>keyhole</i>)		Autoria própria
Excesso de rebarba (<i>flash</i>)		Autoria própria
Trincas		Autoria própria

Fonte: autoria própria.

Figura 24: Dimensão da placa soldada pelo processo FSW.

Fonte: autoria própria.

Quadro 11: Placas soldadas por diferentes geometrias de pinos.

Placas soldadas	Ferramenta
 <p>Ferramenta 1</p>	Cilíndrico de ponta reta
 <p>Ferramenta 2</p>	Rosqueado cônico de ponta arredondada
 <p>Ferramenta 3</p>	Rosqueado cilíndrico facetado de ponta reta
 <p>Ferramenta 4</p>	Rosqueado cilíndrico de ponta arredondada
 <p>Ferramenta 5</p>	Cilíndrico de ponta arredondada
 <p>Ferramenta 6</p>	Rosqueado cônico de ponta reta
 <p>Ferramenta 7</p>	Cilíndrico facetado de ponta reta
 <p>Ferramenta 8</p>	Rosqueado cônico facetado de ponta arredondada

 <p>Ferramenta 9</p>	Rosqueado cilíndrico de ponta reta
 <p>Ferramenta 10</p>	Cônico de ponta arredondada
 <p>Ferramenta 11</p>	Cônico facetado de ponta reta
 <p>Ferramenta 12</p>	Cônico de ponta reta

Fonte: autoria própria.

Em todas as placas soldadas, com exceção da 8 e a 10, foi observado o excesso de rebarba (*flash*) nas laterais da solda, a qual é, possivelmente, oriunda da grande magnitude da força axial (força na direção Z) aplicada durante a soldagem. O *flash* resulta em uma grande perda de material durante o processo, o qual escoava para as laterais da solda após a passagem da ferramenta. Tanto o *keyhole* como o *flash* são considerados defeitos específicos do processo, ocorrendo frequentemente nas soldagens por FSW.

Defeitos associados a túneis (buraco de minhoca) foram observados visualmente nas juntas das ferramentas 2, 3 e 11, o qual pode estar associado ao tipo de pino que não propiciou a mistura adequada para a liga de alumínio AA 5052-O, influenciando diretamente na resistência e vida útil da solda. De acordo com Prabhu *et al.*, (2017) os túneis podem ser formados principalmente devido à entrada de calor inadequada e ao fluxo inapropriado de material deformado na zona soldada. O Quadro 12 ilustra o resumo dos defeitos visuais que cada peça soldada contém.

Quadro 12: Resumo dos defeitos visuais encontrados nas peças soldadas.

Defeitos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Keyhole	X						X		X		X	
Flash	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
Túnel		X	X								X	
Falta de penetração												
Trincas												

Fonte: autoria própria.

4.1.2. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

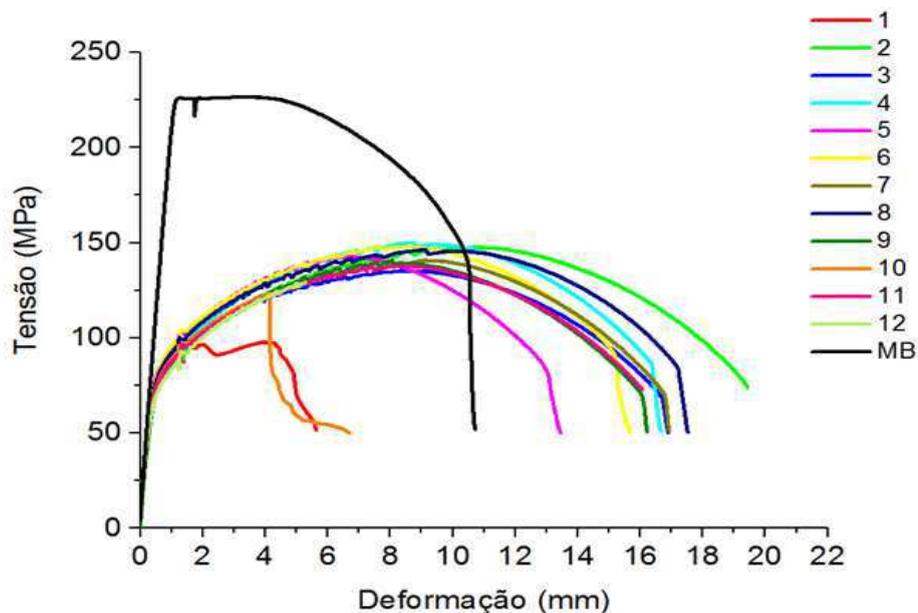
Foi realizado o ensaio de tração uniaxial nas doze juntas soldadas por diferentes perfis de ferramenta, assim como no metal de base e, como respostas, foram obtidos os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT) e deformação de fratura (DEF). Observando as Figuras 25 e 26 é possível notar uma redução do limite de escoamento e do limite de resistência à tração em relação ao metal de base, resultados já esperados de acordo com a bibliografia, visto que, de acordo com Ilangoan *et al.*, (2015) o aporte de calor gerado pela velocidade relativa entre a ferramenta rotativa e o metal de base, resulta em um aumento do crescimento de grãos e dissolução de partículas de segunda fase (precipitados) na zona soldada.

Comparando os resultados obtidos entre as diferentes geometrias da ferramenta, desconsiderando o metal de base, foi notado uma invariabilidade dos parâmetros em relação ao limite de escoamento e limite de resistência à tração, com exceção da ferramenta 1. Essa imutabilidade já foi observada na literatura por Capelari e Mazzaferro (2009), quando soldou ligas de alumínio AA 5052- H34 com velocidade de avanço de 75 mm/min e rotação de 1000 RPM e comparou três tipos de geometrias de pinos, cônica lisa, facetada e cônica com rosca, como pode ser observado no Quadro 13.

Em relação a deformação de fratura, foi observado que as juntas suportaram grandes deformações, acima de 12%, com exceção das juntas 1, 10 e 12 o que condiz com os resultados de Capelari e Mazzaferro (2009), que obtiveram deformações em torno de 20%.

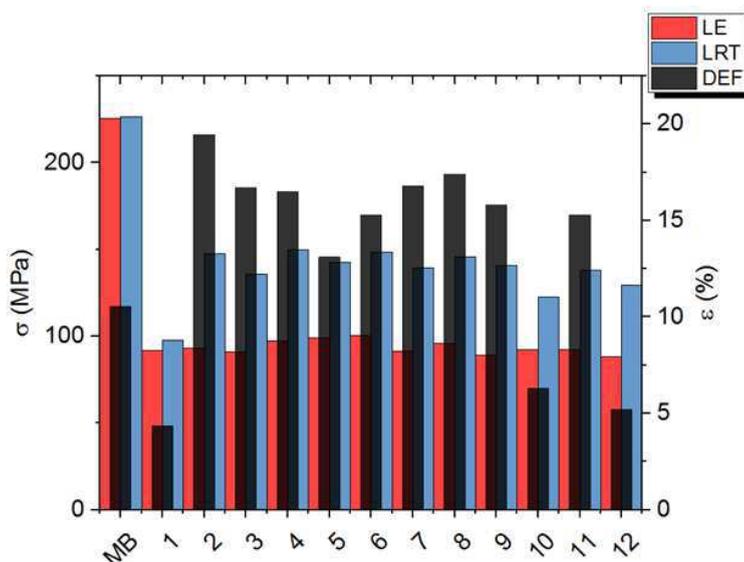
Por fim, analisando os resultados das Figuras 25 e 26, pode-se afirmar que, dentre os doze perfis de ferramenta, apesar da invariabilidade dos resultados de limite de escoamento e de limite de resistência à tração, os menores valores de limite de resistência à tração e deformação à fratura obtidos foram das ferramentas 1, 10 e 12 em relação aos demais.

Figura 25: Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração uniaxial.



Fonte: autoria própria.

Figura 26: Principais valores obtidos no ensaio de tração uniaxial.



Fonte: autoria própria.

Quadro 13: Resultados do ensaio de tração obtidos por Capelari e Mazzafero (2009).

	Pino cônico com rosca	Pino facetado	Pino cônico liso
Limite de escoamento (MPa)	117,00	116,33	115,11
Limite de resistência à tração (MPa)	223,78	221,67	212,67
Deformação de fratura (%)	22,22	24,78	18,22

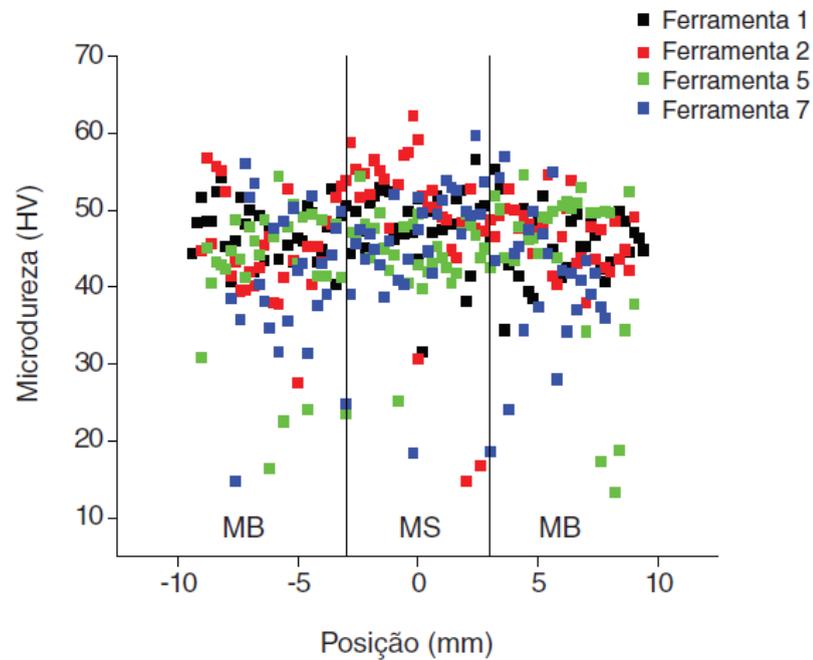
Fonte: Modificado de Capelari e Mazzafero (2009).

4.1.3. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS

Foi realizado um perfil de dureza transversal ao longo da junta soldada em todos os doze corpos de prova a fim de averiguar a dureza do material, como ilustra a Figura 27. Conforme Souza *et al.*, (2015), que realizaram soldas em ligas de alumínio AA 5083-H111 pelo processo FSW, a dureza na zona misturada das ligas de alumínio soldadas pelo processo FSW, tende a aumentar levemente em relação ao metal de base, devido a intensa atividade mecânica nessa região, o que faz com que os grãos, antes considerados grosseiros, se tornem mais refinados. Entretanto, o mesmo não acontece nas regiões adjacentes a zona misturada, pois o calor não é o suficiente para promover o refinamento dos grãos.

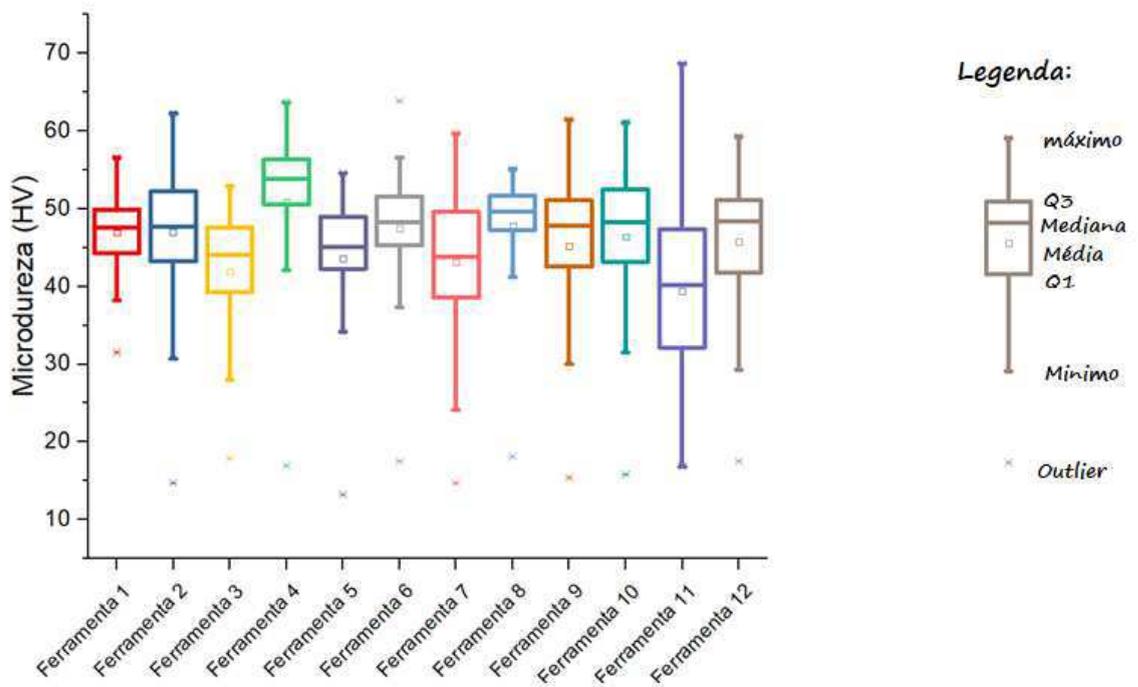
Em ligas tratáveis termicamente, há uma queda na dureza a medida que a temperatura de pico aumenta, na região afetada pelo calor. Isso ocorre porque os precipitados irão coalescer e reduzir a densidade numérica em regiões afastadas da fonte de calor, e irá reentrar em solução quando a temperatura máxima é suficientemente alta (SATO *et al.*, 1999). O resultado é a linha contínua com um mínimo de dureza na zona afetada pelo calor, devido aos efeitos concorrentes de dissolução e re-precipitação. Mas em contraste com ligas tratáveis termicamente, as ligas endurecidas por deformação à frio, como é o caso da liga em estudo, não ocorrem estes fenômenos, resultando em uma dureza sem tendência de crescimento ou decaimento conforme pode ser visualizado na Figura 27 (SVENSSON *et al.*, 2000).

Figura 27: Valores obtidos do ensaio de dureza Vickers de alguns perfis de ferramenta.



Fonte: autoria própria.

Figura 28: *Boxplot* dos valores de dureza para as 12 ferramentas avaliadas.



Fonte: autoria própria.

A Figura 28 ilustra o *Boxplot* dos valores de dureza para as doze placas soldadas pelos diferentes perfis de ferramenta. Como já visualizado na Figura 27, os valores médios e medianos são próximos, não possuindo grandes variações em função do perfil geométrico da ferramenta utilizada. Apesar dos valores próximos, é notável maiores valores de média e mediana para a ferramenta 4. Foi evidenciado que, utilizando-se a ferramenta 11 observa-se uma grande discrepância dos valores de dureza, tendo um range interquartil, grau de dispersão, maior que os demais. Acredita-se que essa discrepância pode ter ocorrido devido aos defeitos de soldagem encontrados na região de análise da dureza dessa junta soldada, já que a mesma apresentou mais defeitos superficiais entre as demais.

4.1.4. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°

A fim de verificar a ductilidade das doze juntas soldadas e do metal de base foram realizados ensaio de dobramento de raiz a 60°, como pode ser observado na Figura 29, que ilustra os dobramentos obtidos no ensaio. Dentre os treze corpos de prova, doze perfis de ferramenta e o metal de base, as juntas soldadas 4, 7 e 10 apresentaram início de pequenas discontinuidades na região soldada. Apesar das falhas, não foi visualizada significativa queda de ductilidade do material em decorrência da presença da solda, pois todas as placas soldadas atingiram o dobramento estabelecido inicialmente.

Figura 29: Corpos de prova após o ensaio de dobramento a 60°.



Fonte: autoria própria.

Como resposta ao ensaio, foi elaborado o Quadro 14 com os valores das cargas máximas suportadas do metal de base e pelas juntas soldadas utilizando cada uma das ferramentas.

Analisando o Quadro 14 é possível verificar que nenhum corpo de prova conseguiu atingir o mesmo patamar da carga suportada do metal de base, já que a solda diminui a resistência ao dobramento do material, devido a alterações microestruturais na região soldada, conforme também confirmado por Souza *et al.*, (2015) nas soldagens de liga de alumínio AA 5083 – H111.

Quadro 14: 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: autoria própria.

Ao se comparar os valores das cargas máximas suportadas pelas juntas soldadas é possível verificar que aquelas obtidas utilizando as ferramentas 1 e a 12 apresentaram menores valores, em torno de 700 N. Esse resultado pode ser atribuído à mistura mecânica insuficiente ocorrida durante o processo de soldagem devido ao formato cônico liso de ponta reta do pino. Resultados obtidos por Capelari e Mazzaferro (2009) com essa geometria de pino, necessitou de novos ajustes de dimensionais ou modificações nos parâmetros de soldagem para poder ser aprovado no ensaio de dobramento realizado. O formato cônico também impõe um grande gradiente de velocidade ao longo da espessura da junta, acentuando a inversão de fluxo no lado de avanço,

levando a uma zona relativamente estagnada não ocorrendo uma distribuição uniforme de fluxo do material que é levado do lado de avanço para o lado de recuo.

Foi evidenciado por Wang *et al.*, (2014) e Hassan *et al.*, (2012) que o pino rosqueado em alta velocidade de soldagem proporcionam maior eficiência de juntas em comparação com o pino reto, ao soldar compósitos de matriz de alumínio utilizando o processo FSW.

Os maiores valores de cargas máximas suportadas foram obtidos utilizando as ferramentas 4 e 9, que possuem a geometria do pino no formato rosqueado e cilíndrico, garantindo uma mistura de material de forma eficiente. O formato rosqueado faz com que ocorra maior transporte de material do lado de avanço para o lado de recuo, ocorrendo uma distribuição uniforme ao longo da junta soldada.

4.1.5. ANÁLISE DOS ENSAIOS PARA A ESCOLHA DA FERRAMENTA

Para a escolha da ferramenta adequada na soldagem da liga AA 5083-O foi realizada uma análise tomando como critérios a resistência à tração e a homogeneidade das juntas soldadas da liga AA 5052-O. Dentre as doze ferramentas utilizadas, foi observado que as soldagens executadas com as ferramentas 2, 3 e 11 apresentaram espaços vazios relacionados a falta de mistura mecânica na região soldada. Acredita-se que pelo fato de os pinos possuírem geometrias cônicas ou facetadas ocorre um fluxo de material insuficiente, ocasionando o defeito de túnel. As outras nove ferramentas não apresentaram defeito de túnel.

No ensaio mecânico de tração uniaxial, foi detectado que, dentre os doze corpos de prova ensaiados, apenas as ferramentas 1, 10 e 12 apresentaram propriedades inferiores as demais, com limites de resistência à tração menores que 130 MPa e deformações em torno de 10%. Em relação ao limite de escoamento, todas as doze ferramentas apresentaram resultados semelhantes, com poucas variações. É possível verificar que apesar de não ter sido detectado nenhuma descontinuidade ou defeito visual nos corpos de prova, os resultados de resistência à tração das juntas mostraram que os pinos lisos das ferramentas 1, 10 e 12 não são adequados para a mistura mecânica das ligas de alumínio da série 5000, como observado por Thomas *et al.*, (2003).

Analisando os resultados obtidos com relação ao ensaio de dobramento de raiz a 60° foi

verificado que todas as juntas soldadas com as diferentes ferramentas alcançaram o dobramento, sem a ocorrência de rupturas ao longo do ensaio. Porém, de acordo com a análises da carga máxima suportada, foi observado que apenas a ferramenta 4 alcançou um valor elevado em comparação as demais.

Em relação a microdureza na região soldada, foi verificado que não teve variações bruscas entre as zonas do metal de base e a zona misturada das juntas soldadas. Em relação ao perfil de microdureza, a maioria das juntas soldadas apresentaram dureza na região soldada em torno de 40HV – 50HV, porém a junta soldada obtida com a ferramenta 4 (rosqueado cilíndrico de ponta arredondada), diferentemente das outras, apresentou uma dureza elevada, em torno de 60HV, ou seja, a recristalização da zona misturada fez com que a estrutura cristalina do material alterasse ao ponto de aumentar a dureza nessa região, mesmo que em variações pequenas.

Tendo em vista os resultados analisados, a ferramenta 4 (pino rosqueado cilíndrico de ponta arredondada) apresentou melhores resultados de acordo com os critérios considerados, resultado também confirmado por Capelari e Mazzaferro (2009), sendo, portanto, eleita para a realização das soldagens da liga de alumínio AA 5083-O.

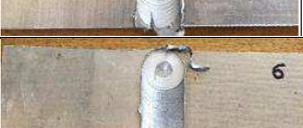
4.2. Caracterização das juntas soldadas da liga AA 5083-O.

4.2.1. INSPEÇÃO VISUAL

Inicialmente, foram realizadas inspeções visuais em todas as onze juntas soldadas com os diferentes parâmetros de soldagem a fim de verificar defeitos superficiais na solda, que incluem: falta de penetração, túneis, furo remanescente e excesso de rebarba (*flash*), já que esses defeitos influenciam nos resultados dos ensaios mecânicos posteriores.

O Quadro 15 apresenta as onze juntas soldadas com os diferentes parâmetros de soldagem e os defeitos identificados em cada caso. Nas juntas soldadas com ângulo de inclinação da ferramenta de 1° foram identificados túneis e irregularidades na superfície soldada. Ao se utilizar o ângulo de inclinação 3°, com os mesmos parâmetros de soldagem, não foi identificado defeitos nas soldas, indicando claramente a influência do ângulo de inclinação na ferramenta com relação à qualidade da junta soldada.

Quadro 15: Placas soldadas por diferentes parâmetros de soldagem.

PLANEJAMENTO	ORDEM ALEATÓRIA	PLACAS SOLDADAS	PARÂMETROS	DEFEITOS VISUALIZADOS
1	8		VA: 70 mm/min VR: 340 RPM ÂNGULO: 1°	Trincas e irregularidades
2	9		VA: 180 mm/min VR: 340 RPM ÂNGULO: 1°	Trincas e irregularidades
3	10		VA: 70 mm/min VR: 1180 RPM ÂNGULO: 1°	Trincas e irregularidades
4	11		VA: 180 mm/min VR: 1180 RPM ÂNGULO: 1°	Trincas e irregularidades
5	1		VA: 70 mm/min VR: 340 RPM ÂNGULO: 3°	-
6	2		VA: 180 mm/min VR: 340 RPM ÂNGULO: 3°	-
7	4		VA: 70 mm/min VR: 1180 RPM ÂNGULO: 3°	-
8	3		VA: 180 mm/min VR: 1180 RPM ÂNGULO: 3°	-
9	5		VA: 125 mm/min VR: 760 RPM ÂNGULO: 2°	-
10	6		VA: 125 mm/min VR: 760 RPM ÂNGULO: 2°	-
11	7		VA: 125 mm/min VR: 760 RPM ÂNGULO: 2°	-

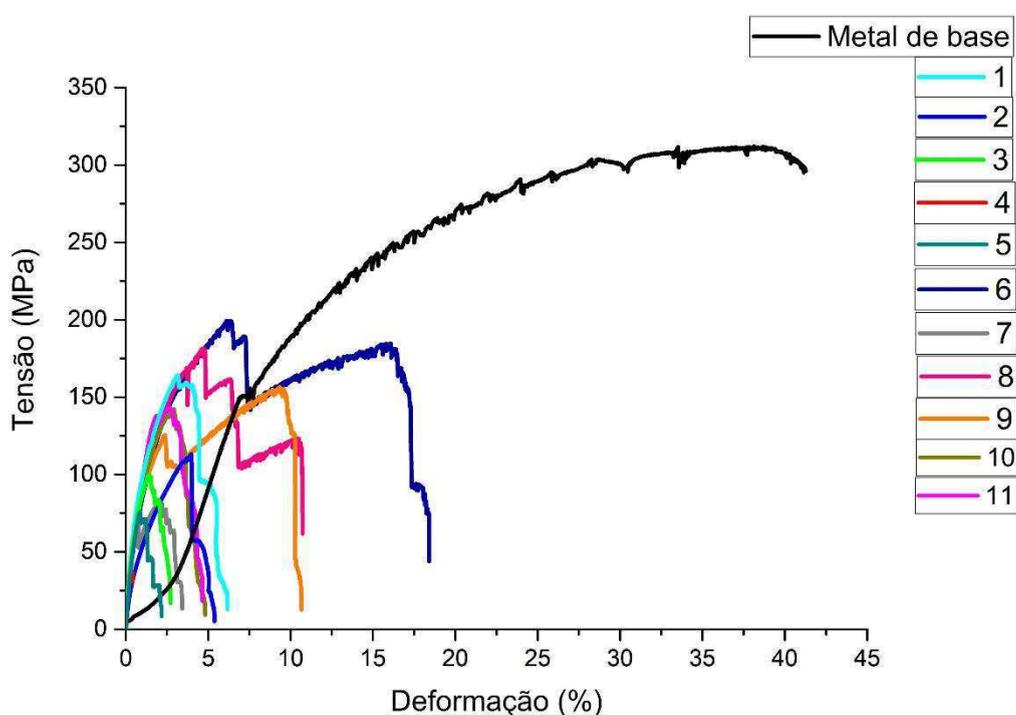
Fonte: autoria própria.

Chen e Kovacevic (2006) relataram em seus estudos sobre o comportamento da liga AA 5456 soldada pelo processo FSW, que, quando o ângulo de inclinação da ferramenta é muito pequeno, como 1°, a junta soldada não se consolida, causando um defeito superficial, conforme constatado no Quadro 15. Tendo, portanto, o ângulo de inclinação da ferramenta uma influência essencial na mistura mecânica do material (transporte de material do lado de avanço para o lado de recuo), na força de atrito e na geração de calor, tanto quanto a sua velocidade de soldagem e de rotação.

4.2.2. ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

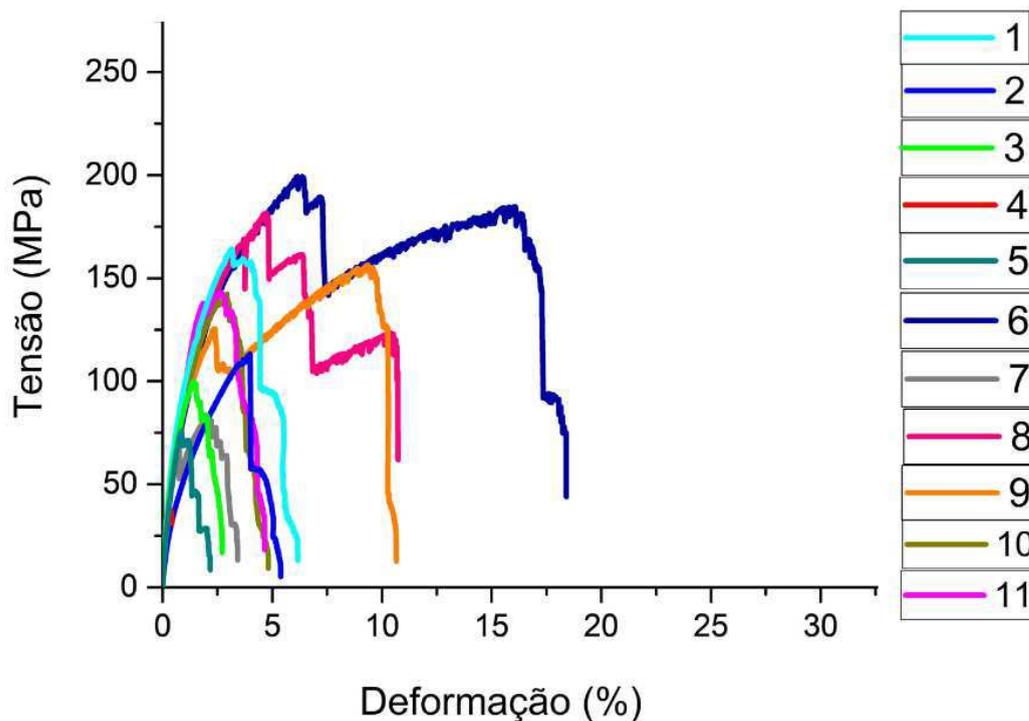
Através do ensaio de tração uniaxial foi possível verificar o limite de resistência à tração e a deformação até a fratura das juntas soldadas com os diferentes parâmetros. A Figura 30 ilustra o gráfico de tração *versus* deformação obtidos durante o ensaio. Visualizando a Figura 30 é notável que nenhuma junta soldada se aproximou dos valores do metal de base.

Figura 30: Gráfico de tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração uniaxial.



Fonte: autoria própria.

Figura 31: Gráfico de tensão versus deformação obtido no ensaio de tração uniaxial sem o metal de base.



Fonte: autoria própria.

A Figura 31 apresenta os resultados de tração apenas das juntas soldadas. Em relação ao limite de resistência a tração é notável uma variação entre as juntas soldadas com os diferentes parâmetros. Pode-se observar que as juntas soldadas com a combinação de parâmetros 6 (VR: 340 RPM) e 8 (VR: 1180 RPM), ambas utilizando um ângulo da ferramenta igual a 3° e velocidade de avanço 180 mm/min obtiveram os maiores valores de limite de resistência à tração, em torno de 200 MPa. Já as juntas soldadas 7, 1 e 3, que tem em comum a velocidade de avanço de 70 mm/min, obtiveram menores valores para o limite, em torno de 100 MPa. Selemat *et al.*, (2016), conseguiu obter juntas soldadas da liga de alumínio AA 5083 com resistência a tração máxima de 255 MPa, 23% menor que o metal de base, o que se aproxima da junta soldada com o parâmetro 6.

De acordo com Colegrove *et al.*, (2007) uma entrada de calor excessiva pode levar a um gradiente de temperatura mais acentuado devido a um menor volume de agitação ocasionado pela ductilidade reduzida do material ao redor da ferramenta. Baixos valores de velocidade de avanço promove uma geração de calor excessiva e, conseqüentemente, um maior fluxo de material inadequado, proporcionando cordões mais largos, fazendo com que ocorra a geração

de defeitos e uma redução nas propriedades mecânicas. Com maior velocidade de avanço, a geração de calor é suficiente para promover a mistura adequada do material, reduzindo a formação de defeitos.

Analisando a deformação atingida nas juntas soldadas, foi verificado uma redução, menor que a metade para a maioria das juntas soldadas, quando comparado com o metal de base, o que não condiz com a literatura. Essa redução foi maior do que as obtidas por Capelari e Mazzafero (2009) ao soldarem juntas da liga AA 5052 que obteve deformações superiores a 18%, resultado só obtido com a combinação de parâmetro 6.

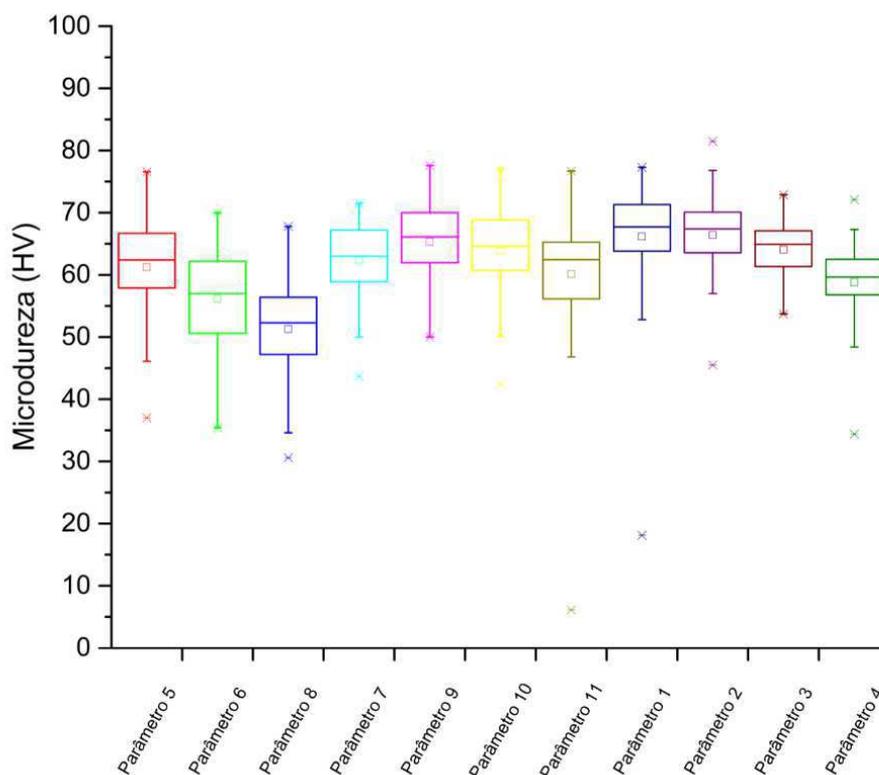
As deformações obtidas parecem ter sido influenciadas pelos defeitos internos da solda, visto que as soldagens realizadas com o ângulo de 1°, (1, 2, 3 e 4) obtiveram menores valores de deformações, como pode ser visualizado na Figura 31.

4.2.3. ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA VICKERS

A Figura 32 apresenta através de um *Boxplot* o resultado das microdureza das juntas soldadas. Verifica-se, como nas juntas soldadas da liga AA 5052-O, que não houve tendência de aumento ou diminuição de valores ao longo das juntas com a variação dos parâmetros de soldagem pelas razões expostas anteriormente com relação as ligas de alumínio da série 5000 (SVENSSON *et al.*, 2000).

Com relação aos valores absolutos das durezas em função da variação dos parâmetros de soldagem pode-se verificar pela Figura 32 que houve algumas variações dos valores médios. Os maiores valores de dureza foram obtidos nas amostras 1 e 9, atingindo valores em torno de 65 HV. Esses valores elevados de dureza podem estar relacionados com a precipitação de intermetálicos da forma Al_3Mg_2 que podem ter surgidos pelo aporte de calor elevado, já que ambas as amostras possuem velocidade de rotação baixa (340 RPM) fornecendo maior calor nas placas soldadas, com a combinação dos outros parâmetros de soldagem. De acordo com Gungor *et al.*, (2014), ao soldar ligas de alumínio AA 6082 pelo processo FSW, aumentando a entrada de calor resulta em envelhecimento natural da zona soldada com dispersão fina de precipitados dentro dos grãos, o que faz com que a dureza não aumente.

Figura 32: *Boxplot* dos parâmetros de soldagem pelo processo FSW.



Fonte: autoria própria.

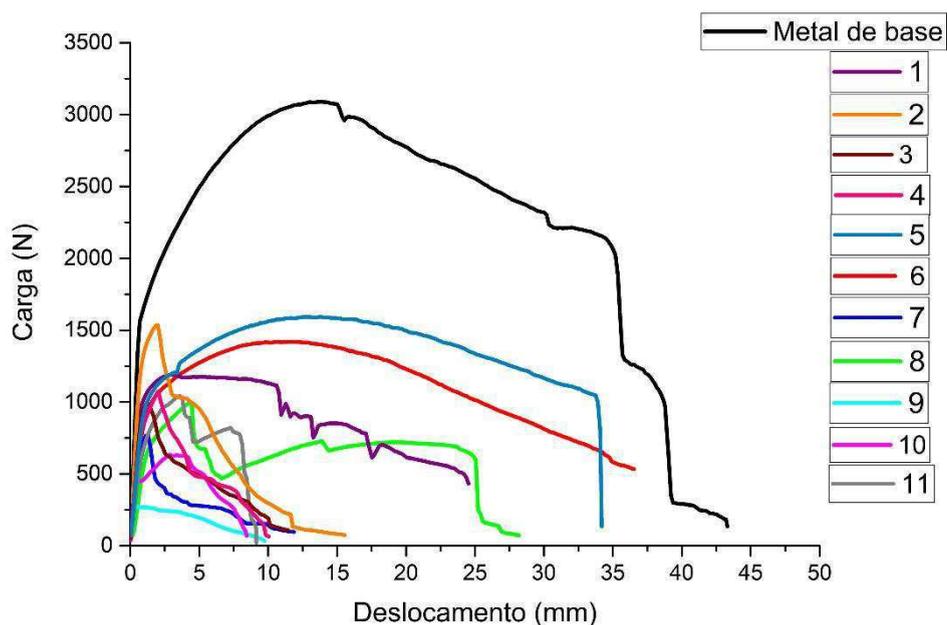
4.2.4. ENSAIO MECÂNICO DE DOBRAMENTO DE RAIZ A 60°

A Figura 33 ilustra o gráfico de carga *versus* deslocamento. Durante a realização do ensaio, apenas os corpos de prova 5 e 6 atingiram o dobramento sem a visualização de nenhum defeito, ao contrário das outras juntas soldadas, que foram visualizadas trincas após o ensaio.

De acordo com a Figura 33, a carga máxima suportada nas juntas soldadas foi de 1500 N, que corresponde a metade da carga suportada do metal de base. Em relação ao deslocamento atingido durante o ensaio, apenas as juntas que corresponde aos parâmetros 5, 6, 7 e 8 atingiram valores acima de 25 mm. Fazendo uma análise das juntas soldadas 5 e 1, que possuem os mesmos parâmetros de velocidade de rotação e avanço, diferenciando apenas o ângulo, é notável a grande diferença entre as cargas suportadas no ensaio, na qual a junta 5 atingiu um

valor de 1500 N e a junta 1 de apenas 1000 N, o que confirma a importância do ângulo de inclinação para o material soldado.

Figura 33: Gráfico de carga *versus* deslocamento obtido no ensaio de dobramento de raiz a 60°.



Fonte: autoria própria.

Ao aumentar o ângulo de inclinação, evitou-se a expulsão do material agitado, fazendo com que o material permanecesse na região da junta. Esse resultado também foi observado por Capelari e Mazzafero (2009) ao soldar ligas AA 5052-H34, que ao variar o ângulo de 0° para 3° obteve uma diminuição do tamanho das trincas.

4.2.5. ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL

Quando se realiza soldagens pelos processos convencionais por fusão surge, nas regiões da zona termicamente afetada tensões residuais trativas e na zona fundida, tensões residuais compressivas, já que o aquecimento excessivo nas regiões adjacentes tende a gerações de tensões térmicas que, por seguinte, gera as tensões residuais.

O processo de soldagem por fricção tende a reduzir essas tensões residuais trativas nas

regiões adjacentes a zona misturada pelo fato de ter menor aporte de calor durante a soldagem e assim, menores variações térmicas.

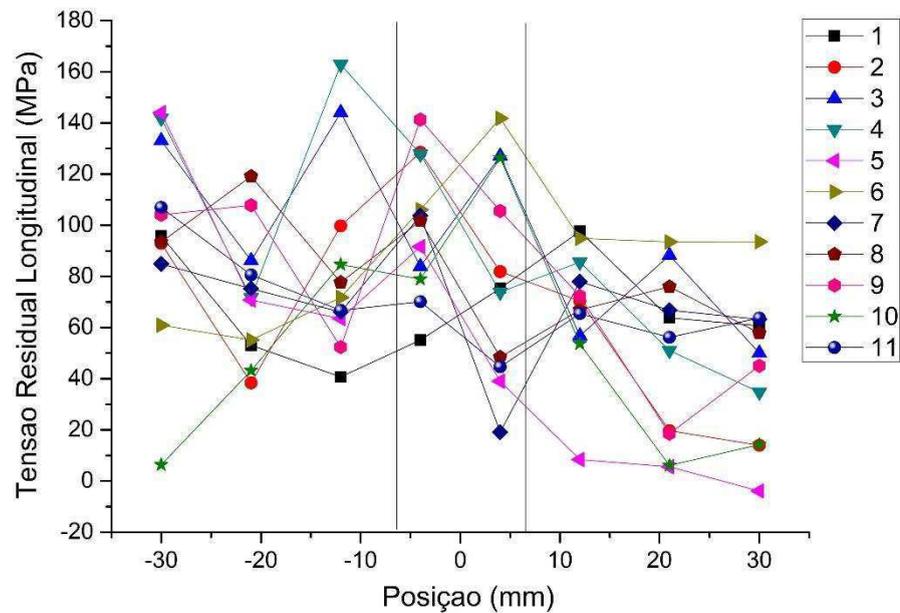
Richards *et al.*, (2010) e Altenkirch *et al.*, (2008), investigaram as tensões residuais em soldas de liga de alumínio de alta resistência pelo processo por fricção. Eles encontraram tipicamente uma distribuição de tensão longitudinal em forma de 'M', onde as tensões residuais de pico de tração estão localizadas perto do limite da zona de ZTA. Perfil de tensão residual na forma de M foi atribuída por Richards *et al.*, (2008) 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 34 e 35.

Analisando as tensões residuais longitudinais, observa-se apenas tensões trativas durante toda a região soldada, independente do parâmetro utilizado, apresentando um pico de maior valor na junta com a combinação de parâmetro 4, localizado na região próxima ao diâmetro do ombro da ferramenta. Foi verificado que as juntas soldadas com combinação de parâmetro 4 e 6 (ambas com velocidade de avanço de 180 mm/min) obtiveram maiores picos de tensões residuais. De acordo com Lombard *et al.*, (2008) o parâmetro dominante para determinar os picos de tensões residuais longitudinais é a taxa de avanço da ferramenta, já que a mesma determina a entrada de calor por unidade de comprimento da solda.

É importante ressaltar que a entrada de energia mais alta 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) e isso está relacionado a análise de todos os parâmetros em conjunto. No caso da combinação de parâmetro 3, apesar de ter uma menor velocidade de avanço, a velocidade de rotação é alta, fazendo que ocorra um gradiente de temperatura mais acentuado e, assim, um pico de tensão residual longitudinal elevado.

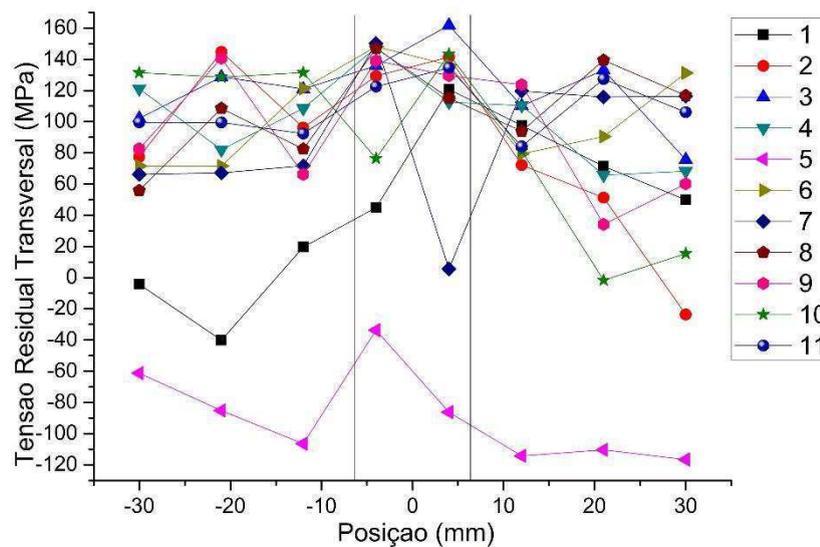
As tensões residuais transversais também obtiveram apenas tensões trativas, com exceção da junta soldada do parâmetro 5. Esses valores obtidos surgem à grande dissipação e variação de calor durante a região, apesar de não entrar no estado fundido.

Figura 34: Gráficos de tensão *versus* distância obtidos nas medições de tensões residuais longitudinais pela soldagem FSW.



Fonte: autoria própria.

Figura 35: Gráficos de tensão *versus* distância obtidos nas medições de tensões residuais transversais pela soldagem FSW.



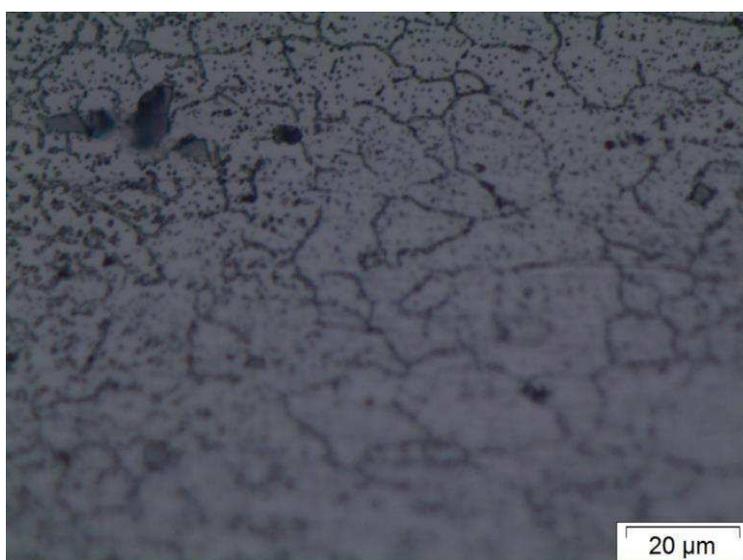
Fonte: autoria própria.

A junta soldada 5, em relação as tensões residuais geradas, obteve menores níveis de tensões residuais longitudinais trativas e tensões residuais transversais compressivas, o que está relacionado diretamente aos parâmetros escolhidos para a realização da solda. Com velocidades de rotação e avanço menores, a geração de calor durante a soldagem é menor, reduzindo o desenvolvimento de tensões térmicas. Isso pode ser visto também na junta soldada 1, a qual possui os mesmos parâmetros de velocidade de rotação e avanço da junta 5 e obteve também um menor valor de tensões residuais transversais.

4.2.6. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Inicialmente, investigou-se a microestrutura do metal de base apresentada na Figura 36. Pode-se observar que o mesmo possui uma elevada quantidade de precipitados Al_3Mg_2 devido ao alto teor de magnésio, como mencionado anteriormente. De acordo com Souza *et al.*, (2015) esses precipitados intermetálicos são predominantes e se mostram formando fileira no sentido de laminação por todo material e se concentra nos contornos de grãos, tornando mais escuros. Essa análise foi observada por Van Horn (1967) ao afirmar que as ligas de Al-Mg, com porcentagem de Mg maior que 4%, quando expostas a altas temperaturas em condições de recozimento, a precipitação ocorre ao longo dos contornos de grãos.

Figura 36: Microscopia ótica da microestrutura do metal de base AA 5083-O.



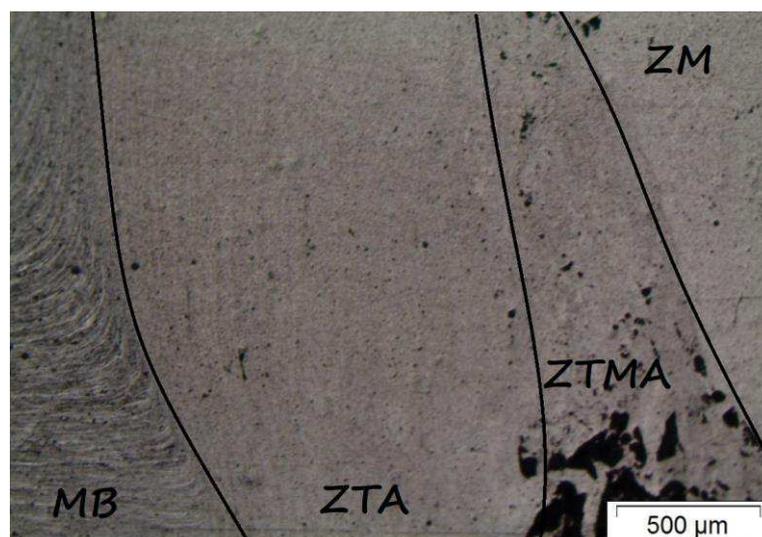
Fonte: autoria própria.

Em relação a microestrutura da região soldada é possível observar, na Figura 37, as quatro zonas da junta soldada: zona Misturada (ZM), zona termomecânicamente afetada (ZTMA), zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB). Também é possível observar a região de transição entre a ZTA e a ZTM, na qual é percebida através de uma deformação plástica associada com o calor gerado no processo, onde é possível observar, na ZTMA, uma região de recristalização parcial (ALMEIDA, 2013).

Anéis de cebola (*onion rings*), ilustrados na Figura 38, são uma evidência direta de fenômenos de transporte de material que ocorrem durante o FSW. O movimento circular induzido leva a círculos que diminuem em raios e formam o sistema de tubos. Neste caso, acredita-se que deve haver mistura completa de material na zona misturada (MISHRA; MA, 2005). Foi evidenciado por Mahoney *et al.*, (1998) e Sutton *et al.*, (2002) através de exames microestruturais que há uma variação abrupta no tamanho de grão e/ou densidade de precipitados nesses anéis.

Em relação a granulometria da região soldada é possível evidenciar uma diferença entre as regiões da zona misturada e das zonas termomecânicamente afetada e termicamente afetada, como ilustra a Figura 38. A zona misturada, como mencionado anteriormente, ocorre a recristalização total dos grãos, diferindo da zona termomecânicamente afetada, onde ocorre apenas a recristalização parcial, obtendo assim, uma granulometria mais grosseira que a ZM. Não foi possível evidenciar na microscopia ótica modificações das extensões e granulometria em função das variações dos parâmetros.

Figura 37: Microscopia ótica da microestrutura da zona soldada pelo processo FSW.



Fonte: autoria própria.

Figura 38: Microestrutura da região de transição entre as zonas misturada, termomecanicamente afetada e termicamente afetada.



Fonte: autoria própria.

4.3. Planejamento experimental fatorial

Para verificar a importância e relação dos parâmetros de soldagem com os resultados das propriedades mecânicas foi realizado um planejamento experimental fatorial $2^3 + 3$ pontos centrais. As respostas inseridas no planejamento foram: dureza média do cordão de solda, limite de resistência à tração, deformação sob tração e carga máxima de dobramento. O Quadro 16 ilustra a matriz planejamento e resultados.

Quadro 16: Matriz planejamento e resultados obtidos

Experimento	VA (mm/min)	VR (RPM)	Ângulo (°)	Dureza média (HV)	LRT (MPa)	Carga máxima (N)	Deformação (%)
1	70	340	1	66,70	75,68	1191,89	2,17
2	180	340	1	66,40	113,17	1536,66	5,38
3	70	1180	1	58,80	36,83	1075,28	2,71
4	180	1180	1	64,00	99,98	992,38	1,13
5	70	340	3	61,19	164,21	1594,54	6,16
6	180	340	3	56,04	119,39	1419,04	18,41
7	70	1180	3	62,30	80,95	766,60	3,42
8	180	1180	3	51,30	181,70	998,00	10,73
9	125	760	2	65,30	156,59	278,57	10,66
10	125	760	2	63,70	142,15	634,30	4,81
11	125	760	2	60,10	143,05	1041,52	6,13

Fonte: autoria própria

De acordo com o Quadro 16, nota-se uma pequena variação nos resultados de dureza média de 51 HV à 66 HV. Já em relação aos outros resultados, a variação se torna maior, o que influencia na vida útil do material soldado. Os valores de resistência à tração e carga máxima

determina o máximo que o material pode suportar antes de se romper, o que é importante para aplicações industriais dos materiais, e seus valores variaram de aproximadamente 36 MPa à 182 MPa e 279 N à 1595 N respectivamente.

Para analisar os resultados, foi utilizado um *software* estatístico com nível de confiabilidade dos resultados de 95%. O Quadro 17 mostra os valores obtidos de P para cada resultado, considerando as interações entre os fatores. O P está relacionado ao nível de significância das variáveis analisadas em um modelo de regressão. Os valores em negrito são os que obedecem à relação P menor/igual a 0,05, evidenciando os valores estatisticamente significativos. Tanto para dureza média como para a deformação à tração o fator ângulo da ferramenta obedece a relação P, demonstrando que são estatisticamente significativos.

Quadro 17: Valor de P para os fatores e interações.

FATORES	VALOR DE P PARA TODOS OS EFEITOS			
	D (HV)	LRT (MPa)	C.M (N)	D (%)
MÉDIA	0,000006	0,001278	0,008420	0,003765
VA	0,259529	0,195054	0,853790	0,065149
VR	0,184403	0,494872	0,314228	0,153639
A	0,053678	0,101048	0,991630	0,034882
VA*VR	0,968293	0,166676	0,990359	0,281978
VA*A	0,080708	0,667440	0,904743	0,094940
VR*A	0,471155	0,763055	0,735033	0,433431
VA*VR*A	0,256188	0,292704	0,634659	0,985175
R²	0,888	0,824	0,391	0,917
R² AJUSTADO	0,626	0,415	0	0,726
MS RESIDUAL	8,223	1109,04	313446,9	6,913

Fonte: autoria própria.

De acordo com Melo *et al.*, (2012) pelo fato de alguns efeitos estarem próximos aos estatisticamente significativos ou manterem influência física sobre o fenômeno podem também ser considerados importantes. Então, considerando a soldagem como um processo complexo e que depende de uma análise mais detalhada, foi adotado um valor de confiabilidade de 90%. O Quadro 18 ilustra os novos efeitos considerados estatisticamente significativos com o fator de confiabilidade de 90%.

Quadro 18: Valor de P para os fatores e interações com confiabilidade de 90%.

FATORES	VALOR DE P PARA TODOS OS EFEITOS			
	D (HV)	LRT (MPa)	C.M (N)	DF (%)
MÉDIA	0,000006	0,001278	0,008420	0,003765
VA	0,259529	0,195054	0,853790	0,065149
VR	0,184403	0,494872	0,314228	0,153639
A	0,053678	0,101048	0,991630	0,034882
VA*VR	0,968293	0,166676	0,990359	0,281978
VA*A	0,080708	0,667440	0,904743	0,094940
VR*A	0,471155	0,763055	0,735033	0,433431
VA*VR*A	0,256188	0,292704	0,634659	0,985175
R²	0,888	0,824	0,391	0,917
R² AJUSTADO	0,626	0,415	0	0,726
MS RESIDUAL	8,223	1109,042	313446,9	6,913

Fonte: autoria própria.

O Quadro 19 a 22 ilustra os resultados das análises de variância para todas as respostas, além do teste F, que de acordo com Rodrigues e Iemma (2009) determina se o modelo é estatisticamente significativo. A relação F calculado maior que F tabelado, demonstra um modelo bem ajustado, porém, para ser um modelo preditivo essa diferença tem que ser no mínimo quatro vezes.

Foi evidenciado, através do teste F, que para as respostas de dureza média e deformação os modelos são estatisticamente significativos e preditivos, já que ambos possuem a diferença entre os F calculado e tabelado maiores que quatro vezes, o que pode ser comprovado pelo valor de R².

Para os modelos das respostas do limite de resistência à tração e carga máxima, foi constatada falta de ajuste, o que não obedeceu ao teste F. Para reverter essa situação, seria necessário a utilização no planejamento experimental com pontos axiais, modelo quadrático.

Quadro 19: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de dureza.

FONTES DE VARIÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	195,706	2	97,853	31,73	3,11
RESÍDUO	24,67	8	3,08		
FALTA DE AJUSTE	17,337	5	3,467		
ERRO PURO	7,332	3	2,444		
TOTAL	220,377	10	$R^2 = 0,888$		

Fonte: autoria própria.

Quadro 20: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de LRT.

FONTES DE VARIÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	15645,668	0	-	-	-
RESÍDUO	3327,122	10	332,712		
FALTA DE AJUSTE	2694,7179	6	449,11		
ERRO PURO	632,404	3	210,801		
TOTAL	18972,79	10	$R^2 = 0,824$		

Fonte: autoria própria.

Quadro 21: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de CM.

FONTES DE VARIÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	604264,7797	0	-	-	-
RESÍDUO	940340,6940	10	94034,069		
FALTA DE AJUSTE	888854,026	6	148142,3377		
ERRO PURO	51486,668	3	17162,222		
TOTAL	1544605	10	$R^2 = 0,391$		

Fonte: autoria própria.

Quadro 22: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de deformação.

FONTES DE VARIACÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F calculado	F tabelado
REGRESSÃO	232,100	3	77,36	26,13	3,07
RESÍDUO	20,74	7	2,96		
FALTA DE AJUSTE	12,314	4	3,07		
ERRO PURO	8,426	3	2,80		
TOTAL	252,841	10	$R^2 = 0,918$		

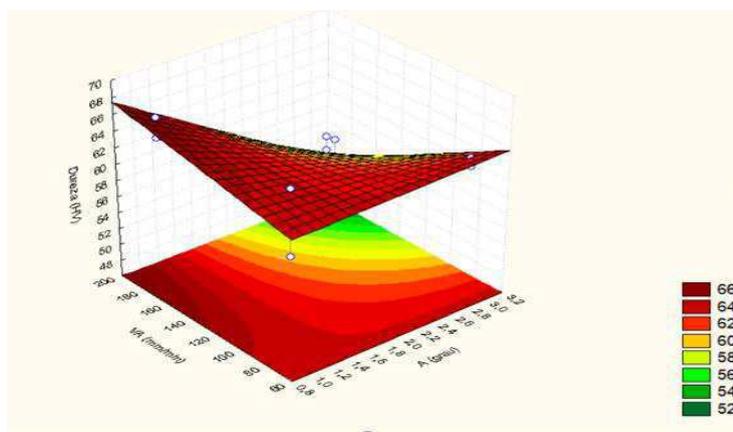
Fonte: autoria própria.

4.3.1. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A DUREZA MÉDIA.

Sendo o modelo da resposta de dureza média considerado estatisticamente significativo, foi elaborado gráficos, de acordo com as Figuras 39 e 40, sobre os comportamentos das variáveis de repostas afetadas pelos fatores de controle. Ao analisar as Figuras 39 e 40 observou que ao aumentar o ângulo de inclinação a dureza média reduz.

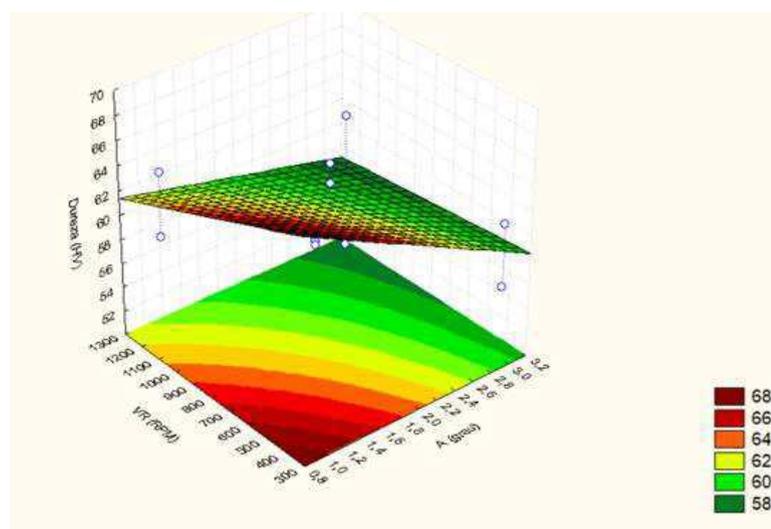
A velocidade de avanço não teve influência sobre o aumento de dureza média, de acordo com a Figura 39. Já a velocidade de rotação teve uma influência no resultado da dureza média. Quando menor seu valor, maior o valor de dureza, como visto na Figura 40. Isso pode ocorrer devido ao maior aporte de calor na região soldada, o que faz com que ocorra maiores precipitações do intermetálico Al_3Mg_2 , aumentando a dureza.

Figura 39: Influência da velocidade de avanço e ângulo de inclinação sobre a dureza nas soldagens por FSW.



Fonte: autoria própria.

Figura 40: Influência da velocidade de rotação e ângulo de inclinação sobre a dureza nas soldagens por FSW.

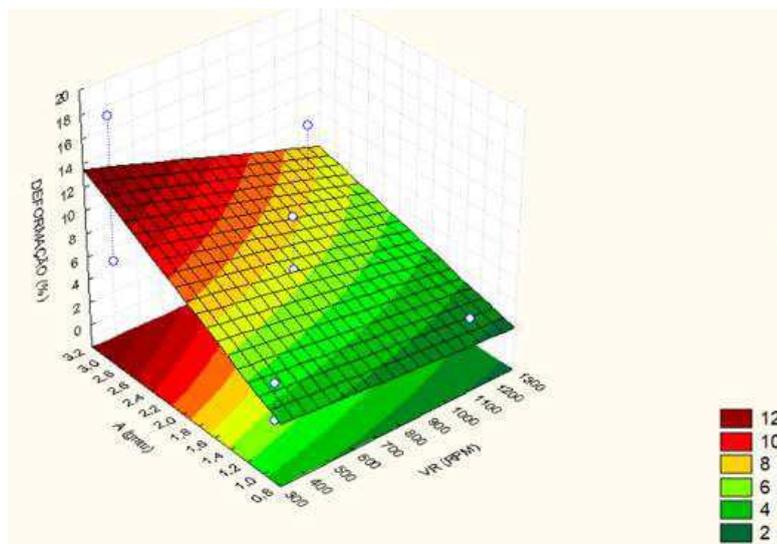


Fonte: autoria própria.

4.3.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A DEFORMAÇÃO.

A Figura 41 ilustra a influência da velocidade de rotação e ângulo de inclinação sobre a deformação nas soldagens pelo processo FSW.

Figura 41: Influência da velocidade de rotação e ângulo de inclinação sobre a deformação nas soldagens por FSW.



Fonte: autoria própria.

Ao analisar a Figura 41 nota-se que, ao aumentar o ângulo de inclinação a deformação aumenta, conforme foi evidenciado nos resultados das propriedades mecânicas anteriores. O ângulo de inclinação está diretamente relacionado com a qualidade da solda, quanto maior o ângulo, menores os defeitos e maior sua resistência.

4.4. Conclusões

Dentre os pinos das ferramentas utilizadas, ficou evidente que o rosqueado cilíndrico de ponta arredonda forneceu melhor mistura e os melhores valores de propriedades mecânicas das juntas soldadas.

Através dos experimentos realizados, ficou evidente que o ângulo de 3° estabeleceu melhores resultados, devido a melhor mistura do material. A combinação da velocidade de avanço de 70 mm/min com a velocidade de rotação de 340 RPM e velocidade de avanço de 180 mm/min e rotação de 340 RPM forneceram melhores resultados das propriedades mecânicas, além de um menor nível de tensões residuais.

Em relação a microestrutura soldada, não foi possível evidenciar alterações microestruturais em relação aos parâmetros estabelecidos, sendo necessário análises posteriores.

Através do planejamento experimental fatorial foi notado que os modelos para a resposta de limite de resistência à tração e carga máxima não foram estatisticamente significativos, sendo necessário a aplicação do modelo quadrático nesses casos. Já para os modelos de dureza média e deformação, os modelos foram considerados ajustados e preditivos.

5. REFERÊNCIAS

ABAL. **Características químicas e físicas**. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em < <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/#accordion5>>. Acesso em: janeiro de 2019.

ABAL. **Ligas**. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2016.

ABAL. **Fundamentos do alumínio**. Associação Brasileira do Alumínio. 2007. Disponível em <<http://abal.org.br>>. Acesso em: 30 novembro de 2016.

AGUDO, L. EYIDI, D.; SCHMARANZER, C. H.; ARENHOLZ, E.; JANK, N.; BRUCKNER, J., & PYZALLA, A. R. Intermetallic FeAl₃ phases in a steel/Al-alloy fusion weld. **Journal of Materials Science and Engineering**, v. 42, p. 4205-4214, 2007. DOI 10.1007/s10853-006-0644-0.

ALMEIDA, D. T. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O**. (Trabalho de Final de Curso). Departamento de Engenharia mecânica. UNIJUÍ, Panambi, 2011.

ALTENKIRCH, J.; STEUWER, A.; PEEL, M.; RICHARDS, D.; WITHERS, P. The effect of tensioning and sectioning on residual stresses in aluminium AA 7749 friction stir welds. **Mater. Sci. Eng.** v. 488, p. 16–24. 2008.

ALUAUTO. **O alumínio nas águas**. Disponível em < <http://aluauto.com.br/o-aluminio-nas-aguas/>>. Acesso em: novembro 2018.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASIL-ALEMANHA. Alumínio na Arquitetura e na Construção Civil. In: **Anais do 1. Simpósio Internacional da VDI sobre Tecnologia do Alumínio. Matéria-prima, transformação, aplicações e reciclagem**. São Paulo, 2003.

ASM. **American Society for Metals**. Disponível em < <https://www.asminternational.org/>>. Acesso em: novembro de 2018.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **B209-14 Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate**. West Conshohocken, 2019.

BALASUBRAMANIAN, N.; GATTU, B.; MISHRA, R. Process forces during FSW of aluminium alloys. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.14, p. 141. 2009.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: An Introduction to Designs, Data Analysis and Model Building**. New York: Willey, 1978.

ÇAM, G.; MISTIKOGLU, S. Recent developments in friction stir welding of Al- alloys. **ASW International**, p. 1936-1953. 2014.

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.

CERVEIRA, R. L. L. P. **Caracterização experimental do comportamento mecânico sob solitação multiaxial em junções de chapas AA 2024-T3 soldadas por fricção-mistura**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

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.

COLEGROVE, P. A.; SHERCLIFF, H. R. Two-dimensional CFD modelling of flow round profiled FSW tooling. **Sci Technol Weld Join**, p. 483–92. 2004.

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

COPPERMETAL. **Informações técnicas alumínio 5083**. Disponível em: <http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi5083.pdf>. Acesso em: 11 de maio. 2017.

COPPERMETAL. **Informações técnicas alumínio 5052**. Disponível em: <<http://www.coppermetal.com.br>>. Acesso em: 11 de maio. 2017.

CRAWFORD, R.; COOK, G. E.; STRAUSS, A. M.; HARTMAN, D. A.; STREMLER, M. A. Experimental defect analysis and force prediction simulation of high weld pitch friction stir welding. **Sci Technol Weld Join**, v. 11, p. 657-65. 2006.

ELANGO VAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA 2219 aluminium alloy. **Mater Sci Eng**, p. 7–18. 2007.

FERRARI, R. **Caracterização de liga metálica a base de alumínio – magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas**. 2008. (Mestrado em tecnologia nuclear-materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

FIORAVANTI, A. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA 2024-T3 e AA 7075-T6**. 2008. (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

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

GARCÍA-BERNAL, M. A.; MISHRA, R. S.; VERMA, R.; HERNÁNDEZ-SILVA, D. Influence of friction stir processing tool design on microstructure and superplastic behavior of Al-Mg alloys. **Materials Science & Engineering**, v. 670, p. 9–16. 2016.

GUNGOR, B.; KALUC, E.; TABAN, E.; SIK, A. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys. **Materials and Design**, v. 56, p. 84–90. 2014.

HASSAN, A. M.; QASIM, T.; GHAITHAN, A. Effect of pin profile on friction stir welded aluminum matrix composites. **Mater. Manuf. Process**, v. 27, p. 1397–1401, 2012.

ILANGOVAN, M.; RAJENDRA, S. BALASUBRAMANIAN, V. Microstructure and tensile properties of friction stir welding dissimilar AA 6061-AA 5086 aluminium alloy joints. **Transactions of nonferrous metals society of China**, p. 1080-1090. 2015.

INFOMET. **Informações técnicas**. Disponível em < <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=53>>. Acesso em: outubro 2017.

KUMAR, S.; ASHOK, D.; NARAYANAN, S. Investigation of friction stir butt welded aluminium 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 Mg-Zn-Y alloy, **Materials Science Forum**, v. 475 - 479, p. 555-558. 2005.

LEAL, R.; LOUREIRO, A. Defect formation in friction stir welding of aluminium alloys. **Adv Mater Forum II**. 2004.

LIMA, M. S. S. S. **Avaliação das tensões residuais de juntas soldadas do aço API L X80 utilizado na indústria do petróleo**. (Dissertação em engenharia mecânica), Campina Grande, UFCG. 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. **Eng Fract Mech**. v. 75, p. 341-54. 2008.

MAHONEY, M. W.; RHODES, C. G.; FLINTOFF, J. G.; SPURLING, R. A.; BINGEL, W. H. Properties of FSW 7075 T651 aluminum. **Metall. Mater. Trans.**, v. 29, p. 1955. 1998.

MCCLURE, J. U. C.; TANG, W.; MURR, L. E.; GUO, X.; FENG, Z.; GOULD, J. E. A thermal model for friction stir welding. In: Vitek JM, David SA, Johnson JA, Smartt HB, DebRoy T, editors. **Trends in welding research**. Ohio, USA: ASM International, p. 590–5. 1998.

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.

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

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

NANDAN R.; DEBROY, T.; BHADSHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. **Progress in Materials Science**. v.53, p. 980–1023. 2008.

NANDAN, R.; ROY, G. G.; DEBROY, T. Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding. **Metall Mater Trans.**, v. 37, p. 1247-59. 2006.

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

OKUMURA, T; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1982.

PRABHU, R. S.; SHETTIGAR, A.; RAO, S.; HERBERT, M. Influence of Welding Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Matrix CompositeS. **Materials Science Forum**, v. 880, p. 50-53. 2017.

RAO D.; HUBER, K.; HEERENS, J.; SANTOS, J. F. & HUBER, N. Asymmetric mechanical properties and tensile behavior prediction of aluminum alloy 5083 friction stir welding joints. **Materials Science &Engineering**. v.565, p. 44–50. 2013.

REIS, M. N. **Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação técnica das esquadrias de alumínio**. 2006. (Mestrado em tecnologia da arquitetura). FAUUSP. São Paulo. 2006.

RICHARDS, D.; PRANGNELL, P.; WITHERS, P.; WILLIAMS, S.; NAGY, T.; MORGAN, S. Efficacy of active cooling for controlling residual stresses in friction stir welds. **Sci. Technol. Weld. Joining**. v. 15, p. 156–165. 2010.

RICHARDS, D.; PRANGNELL, P.; WILLIAMS, S.; WITHERS, P. Global mechanical tensioning for the management of residual stresses in welds. **Mater. Sci. Eng.** v. 489, p. 351–362. 2008.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos. Campinas-SP**. Editado pela AMIC, 2009.

ROSENFELD, M.J. Factors to Consider when Evaluating Damage on Pipe lines. **Oil & Gas Journal**, 2002.

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

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.

SELAMAT, N. F. M.; BAGHDADI, A. H.; SAJURI, Z.; KOKABI, A. H. Friction stir welding of similar and dissimilar aluminium alloys for automotive applications. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 13. 2016.

SIQUEIRA FILHO, A. V. **Estudo comparativo das tensões residuais em juntas soldadas pelas técnicas de medição por coordenadas e difração de raios-x**. 2012. 86 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2012.

SOUZA, D. M.; PINTO, H. C.; SANTOS, J. F.; COELHO, R. S. Estudo das propriedades mecânicas, microestruturais e tensões residuais da liga de alumínio AA 5083-H111 soldadas por friction stir welding – FSW. **In: 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**; Salvador, Brasil; 2015.

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

SU J. Q.; NELSON, T. W.; STERLING, C. J. A new route to bulk nanocrystalline materials. **Journal Material Res.** v. 18, p. 1757–60. 2003.

SUTTON, M. A.; YANG, B.; RENOLDS, A. P.; TAYLOR, R. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. **Mater. Sci. Eng.** v. 323, p. 160. 2002.

SVENSSON, L. E.; KARLSSON, L.; LARSSON, H.; KARLSSON, B.; FAZZINI, M.; KARLSSON, J. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloys with special reference to AA 5083 and AA 6082. **Sci Technol Weld Join.** v. 5, p. 285-96. 2000.

THOMAS, W. M.; STAINES, D. G.; NORRIS, I. M.; DE FRIAS, R. **Friction stir welding tools and developments**. The Welding Institute. 2003.

THREADGILL, P. L.; LEONARD, A.; SHERCLIFF, H.; & WHITERS, P. Frictions stir welding of aluminium alloys. **International Materials Reviews**, v. 54(2), pp. 49-93. 2009.

VALDUNGA, F. **Novas tecnologias transformam Boeing 787 em avião dos sonhos**. 2011. Cavok. Disponível em <<http://www.cavok.com.br/blog/novas-tecnologias-transformam-boeing-787-em-aviao-dos-sonhos/>>: Acesso em: 30 de novembro de 2018.

VAN HORN, K. R. Aluminum. **American Society for Metals**, v. 1, p. 375, 1967.

WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. **Soldagem processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA., 1992.

WANG, D.; WANG, Q. Z.; XIAO, B. L.; MA, Z. Y. Achieving friction stir welded SiCp/Al–Cu–Mg composite joint of nearly equal strength to base material at high welding speed. **Mater. Sci. Eng.** v. 589, p. 271–274, 2014.

WHITERS, P. BHADESHIA, K. Residual Stress, Part 2 – Nature and Origins. **Material Science and Technology**, v. 17, p.366 – 375. 2001.

WITHERS, P. Residual stress and its role in failure. **Reports on Progress in Physics**, v.70, n.2211–2264, 2007.

WHITE MARTINS. **Soldagem do alumínio e suas ligas.** Disponível em <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo96.pdf>.> Acesso em: 09 de maio. 2017.