

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais
PPGE3M

**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E AVALIAÇÃO METAL MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS DA LIGA AA 5083-O REALIZADAS PELO PROCESSO
DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA**

Nicole Monique Brum Walter

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2019

NICOLE MONIQUE BRUM WALTER

**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E AVALIAÇÃO METAL MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS DA LIGA AA 5083-O REALIZADAS PELO PROCESSO
DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2019

NICOLE MONIQUE BRUM WALTER

**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E AVALIAÇÃO METAL MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS DA LIGA AA 5083-O REALIZADAS PELO PROCESSO
DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora em 22/04/2019

Cleber Rodrigo de Lima Lessa

Guilherme Lemos

William Haupt

Dedico este trabalho aos
meus pais Ana Lúcia e Jorge
Walter por todo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma me apoiaram na execução desse trabalho, ao meu Professor orientador Afonso Reguly e ao Professor Telmo (in memoriam) pela dedicação e confiança, ao LAMEF e todos amigos de lá, em especial a Aline Albaneze, Antônio Stadlander, Carla Amavisca, Diogo Buzzatti, Douglas Martinazzi, Fabiano Mattei, Késsia Leão, Jerônimo Schroeder, Jonas Buzzatti, Mariane Chludzinski, Rafael Eugênio e aos demais amigos do grupo ProEng CDT, a empresa Bruning Tecnometal pela parceria e material, aos órgãos CNPq e CAPES pelo apoio financeiro e a todos meus amigos e família, sem vocês nada disso seria possível.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	Revisão Bibliografica.....	4
3.1	Alumínio e suas ligas	4
3.1.1	Ligas de Alumínio-Magnésio	8
3.1.2	Ligas de Alumínio AA 5083	10
3.1.3	Soldagem das ligas de Alumínio.....	12
3.2	Processos de união no estado sólido.....	14
3.2.1	Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica ou <i>Friction Stir Welding</i> (FSW) 15	
3.2.2	Processo de FSW em ligas de alumínio	19
3.2.3	Evolução Microestrutural e Propriedades mecânicas das Soldas FSW 20	
3.2.4	Defeitos na Soldagem FSW	23
3.2.5	Definição de parâmetros do processo FSW	25
3.3	Projeto de Experimentos Box-Behnken.....	27
4.	Procedimento Experimental	29
4.1	Descrição da metodologia.....	29
4.2	Equipamento utilizado	31
4.3	Material	31
4.4	Parâmetros de Soldagem.....	32
4.5	Análise Macrográfica e Microestrutural	35
4.6	Ensaio de Dobramento.....	35
4.7	Ensaio de Microdureza.....	37
4.8	Ensaio de Tração	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Definição dos Parâmetros de Soldagem	40
5.2	Análise Macroestrutural.....	42

5.2.1	Inspeção Visual	42
5.2.2	Macrografias	45
5.3	Avaliação Mecânica	49
5.3.1	Ensaio de Dobramento	49
5.3.2	Ensaio de Microdureza	51
5.3.3	Ensaio de Tração.....	53
5.4	Análise Microestrutural.....	64
6.	Conclusões	74
7.	Sugestões para trabalhos futuros	76
8.	Referências	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases Al-Mg.....	9
Figura 2 - Efeito da adição de magnésio em solução sólida nas propriedades mecânicas de ligas binárias Al-Mg no estado recozido.....	10
Figura 3 - Desenho esquemático demonstrando mais detalhes sobre a ferramenta utilizada no processo.	17
Figura 4 - Desenho esquemático do processo FSW.....	17
Figura 5 - Desenho esquemático das regiões típicas de uma junta transversal soldada por FSW, sendo: A- Material Base (MB), B- Zona Afetada pelo Calor (ZAC), C- Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA) e D- Zona de Mistura (ZM).....	22
Figura 6 - Perfil de dureza da secção transversal de uniões soldadas pelo processo FSW das ligas AA5083-O e AA5083-H321.....	23
Figura 7 - Janela de parâmetros ideais do processo FSW.....	24
Figura 8 - Típicos defeitos de juntas soldadas pelo processo FSW.....	25
Figura 9 - Representação gráfica do planejamento Box-Behnken para três variáveis.....	27
Figura 10 - Fluxograma representando a metodologia utilizada no trabalho....	30
Figura 11 - Máquina de soldagem FSW utilizada para realização das soldas.	31
Figura 12 - Geometria da ferramenta utilizada para a realização das soldas. .	32
Figura 13 - Curvas de otimização da variável de resposta “Nota”.....	33
Figura 14 - Geometria dos corpos de prova para o Ensaio de Dobramento. ...	36
Figura 15 - Imagem do Ensaio de Dobramento em andamento.....	36
Figura 16 - Esquema do perfil de dureza realizado ao longo de duas posições da espessura das amostras em secção transversal as soldas: a 2,1 mm e 4,2 mm da superfície de soldagem.	37
Figura 17 – Corpos de prova usinados para o ensaio de tração em a) após usinagem, antes de ser lixado, b) após preparação para o ensaio parte superior da solda, c) parte inferior da solda.	39
Figura 18 - Soldas realizadas durante os testes de parâmetros a) Juntas soldadas testes. b) Detalhe do defeito gerado.	41
Figura 20 - Imagens das amostras: 6, 10, 11, 12, 13 e 15 após ensaio de dobramento	49

Figura 21 - Perfis de dureza Vickers realizados nas amostras a) 6, b) 10, c) 11 e d) 13.	52
Figura 22 - Curvas tensão-deformação obtidas a partir de um corpo de prova representativo para cada combinação de parâmetros e também do metal base conforme cores e estilos indicados no gráfico.....	54
Figura 23 – Gráfico em colunas com os resultados do ensaio de tração: limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento do material base e juntas soldadas: 6, 10, 11 e 13.....	57
Figura 24- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 6: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) deformação da zona central da fratura com microcavidades, g) severa deformação plástica do material na zona central de fratura em maior detalhe.	61
Figura 25- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 10: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) deformação da zona central da fratura com microcavidades,	62
Figura 26- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 11: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) severa deformação plástica do material na zona central de fratura em maior detalhe.	63
Figura 27- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 13: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura com a presença de microcavidades, e) deformação da zona central em maiores detalhes.	64
Figura 28 - Macrografia esquemática demonstrando os locais das microestruturas representadas no trabalho, sendo a) Metal Base (MB), b) Interface entre o lado de avanço (LA) e a zona de mistura raiz, c) Zona de mistura raiz (<i>onion rings</i>), d) Interface entre o lado de retrocesso (LR) e zona de mistura raiz, e) Interface entre LA e ZM centro, f) ZM centro e g) Interface entre	

LR e ZM centro, h) Interface entre LA e ZM topo, i) ZM topo e j) Interface entre LR e ZM topo.....	65
Figura 29 – Micrografia da região "a". Microestrutura do metal base para a liga AA 5083 laminada. a) Visão geral da microestrutura. b) detalhe dos precipitados Al ₆ MnFe (maiores) e AlMgSi (menores) alinhados com o sentido de laminação. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	66
Figura 30 - Micrografias da região "b". Microestrutura na região de interface da ZTMA com LA. a) Visão geral da região. b) Em maior detalhe observando-se os precipitados acompanhando o fluxo de material. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	66
Figura 31 - Micrografia da região "c". Microestrutura típica de uniões soldadas pelo processo FSW apresenta os <i>onion rings</i> e precipitados distribuídos. a) visão geral dos <i>onion rings</i> . b) maior detalhe dos <i>onion rings</i> . c) região bem no centro dos <i>onion rings</i> apresentando os precipitados em maior detalhe. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	67
Figura 32 - Micrografias da região "d". Microestrutura interface entre a ZTMA e LR. a) Visão geral da região de interface. b) maior detalhe se observa o alinhamento dos precipitados com a deformação do material. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	68
Figura 33 - Micrografias da região "e". Microestrutura da região entre a ZM e LA no centro da solda apresenta severa deformação do material. a) Visão geral demonstrando a interface. b) em maior detalhe o fluxo de material proveniente do processo de soldagem. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller. ...	68
Figura 34 - Micrografias da região "f". Microestrutura da ZM no centro da união soldada. a) visão geral da ZM na posição central da união soldada. b) microestrutura da ZM central com fluxo de material causado pelo movimento de rotação da ferramenta. c) microestrutura da ZM central em maior detalhe. d) em maior detalhe precipitados da Zm central. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	69
Figura 35 - Micrografias da região "g". Microestrutura entre ZM central e LR demonstrando a deformação do material. a) visão geral da microestrutura na interface entre ZM e LR bem no centro da união soldada. b) microestrutura na interface entre ZM e LR central demonstrando o fluxo do material. c) fluxo de material com precipitados em maior detalhe. d) microestrutura em maior	

detalhe com precipitados acompanhando o fluxo de material . Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	70
Figura 36 - Micrografias da região "h". Microestrutura na interface entre o LA e a ZM na parte superior da união soldada. a) Visão geral da interface entre as ZM e LA. b) interface em maior detalhe. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	71
Figura 37 - Micrografias da região "i". Microestrutura na ZM na parte superior da união soldada. a) visão geral demonstrando o fluxo de material. b) microestrutura da ZM superior em maior detalhe. c) microestrutura com grande presença de precipitados. d) em maior detalhe precipitados presentes nessa região. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	71
Figura 38 - Micrografias da região "j". Microestrutura entre a ZM e o LR de solda. a) visão geral da zona de interface entre ZM e LR da união soldada. b) em maior detalhe o fluxo de material do LR da união soldada. c) microestrutura com a presença de precipitados. d) em maior detalhe os precipitados dessa região. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas típicas para o alumínio.....	4
Tabela 2 - Principais elementos de liga das séries de alumínio.....	5
Tabela 3 - Nomenclatura de tratamentos realizados em ligas de alumínio.....	6
Tabela 4 - Limites máximos de composição de cada elemento para ligas de alumínio 5083.....	11
Tabela 5 - Propriedades mecânicas típicas da liga de alumínio 5083.....	11
Tabela 6 - Combinações de parâmetros do BBD aplicado a três fatores.....	28
Tabela 7 - Composição química da ferramenta utilizada.....	32
Tabela 8 - Parâmetros utilizados e seus respectivos níveis.....	34
Tabela 9 - Condições de ensaios e variações de parâmetros utilizados.....	34
Tabela 10 - Fotos das juntas soldadas produzidas de acordo com a matriz de parâmetros, apresentada na Tabela 9, definida para condução deste trabalho.....	42
Tabela 11 - Macrografias das uniões soldadas obtidas sendo cada número de solda correspondente aos parâmetros da Tabela 9.....	46
Tabela 12 – Corpos de prova das juntas soldadas rompidos após o ensaio de tração.....	54
Tabela 13 - Médias e desvios padrões dos valores de alongamento, limites de escoamento e resistência do material base e das soldas: 6, 10, 11 e 13.....	56
Tabela 14 - Macrografias das fraturas das juntas soldadas após o ensaio de tração.....	58
Tabela 15- Imagens realizadas em lupa de baixo aumento das superfícies de fratura dos corpos de prova após o ensaio de tração das respectivas soldas a) 6, b) 10, c) 11 e d) 13.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Aluminum Association
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	<i>American Society for Materials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBD	Box-Behnken Design
FSW	Friction Stir Welding
FSSW	Friction Stir Spot Welding
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization
N	Newton
LA	Lado de Avanço de soldagem
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LR	Lado de Retrocesso de soldagem
MB	Material Base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia óptica
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
Rpm	Rotações por minuto
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
ZAC	Zona Afetada pelo calor
ZM	Zona de Mistura
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada

RESUMO

A soldagem de alumínio e suas ligas apresenta algumas peculiaridades em relação à soldagem dos aços. A aplicação de processos de soldagem convencionais de fusão para alumínio encontra maiores dificuldades, devido a algumas propriedades desse material, tais como, rápida formação de óxido na superfície, maior condutividade térmica, alto coeficiente linear de expansão, elevada capacidade de absorver gases. Portanto, processos alternativos que envolvam menores temperaturas são uma boa opção para alumínio e suas ligas, como, por exemplo, o processo de soldagem por fricção. O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica ou (*Friction Stir Welding - FSW*) é um processo que ocorre no estado sólido, essa característica apresenta um ótimo potencial para soldagem de alumínio e suas ligas. Neste trabalho foi utilizado o planejamento de experimentos Box-Behnken, variando rotação [rpm], velocidade de avanço [mm/min] e penetração do ombro da ferramenta de soldagem [mm]. As chapas soldadas são da liga AA 5083-O com espessura de 6,35 mm. As juntas soldadas foram avaliadas mecânica e metalurgicamente a fim de analisar os efeitos dos melhores parâmetros nas propriedades mecânicas e microestrutura das juntas. Os resultados obtidos demonstram que essas ferramentas de planejamento de experimentos podem fornecer parâmetros adequados para obter uniões consolidadas. Foram obtidos após o ensaio de tração para uma junta soldada 132 MPa de limite de escoamento, 290 MPa de limite de resistência à tração e 22 % de alongamento. Outro fator observado é que para este material nas condições soldadas não houve significativa mudança no perfil de microdureza ao longo da junta soldada e o material base, sendo essa ficando entre 65 e 85 HV. Além disso, foi verificado que as falhas tanto do ensaio de dobramento quanto do ensaio de tração ocorreram na zona de mistura do lado de avanço da solda e os defeitos apareceram nesta mesma zona.

Palavras-chave: soldagem no estado sólido, soldagem por fricção (FSW), soldagem de alumínio, ligas de alumínio, liga AA 5083-O.

ABSTRACT

Welding of aluminum and its alloys presents some peculiarities in relation to welding of steels. The application of conventional welding processes for aluminum finds greater difficulties, due to some properties of this material, such as rapid formation of oxide on the surface, high thermal conductivity, high linear expansion coefficient, easy gases absorption. Therefore, alternative processes involving lower temperatures are a good option for aluminum and its alloys, such as the friction welding process. The Friction Stir Welding (FSW) process, as a process that occurs in the solid state, presents an excellent potential for welding of aluminum and its alloys. In this work, the optimization of parameters was carried out through the planning of Box-Behnken experiments, varying rotation [rpm], feed rate [mm / min] and shoulder penetration of the welding tool. The welded plates are of the alloy AA 5083-O with thickness of 6.35 mm. The welded joints were evaluated mechanically and metallurgically in order to analyze the effects of the parameters on the mechanical properties and microstructure of the joints. The results obtained demonstrate that with suitable parameters it is possible to obtain consolidated bonds for the material AA 5083-O by the FSW process, even with tensile strengths very close to or even higher than that of the base metal, thus 132 MPa of yield strength, 290 MPa of tensile strength and 22 % of elongation for one of the welded joints. Another factor observed is that for this material under welded conditions there was no significant change in the microhardness profile along the weld joint and the base material, keeping between 65 and 85 HV. In addition, it has been found that the failures of both the bend and tensile test tend to occur on the stir zone at advancing side of the weld and the voids showed up at the same local.

Keywords: solid state welding, friction stir welding (FSW), aluminum welding, aluminum alloys, AA 5083-O alloy.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de alumínio e suas ligas têm demonstrado um grande crescimento devido a algumas de suas propriedades. Dentre outras, uma característica interessante desse metal é a ótima relação resistência mecânica/peso que pode ser obtida em suas ligas.

O setor de transportes é o maior consumidor de alumínio do mundo. O alumínio está presente em praticamente todos os sistemas e componentes utilizados na fabricação de veículos mais leves, menos poluentes e com melhor desempenho (ABAL APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO, 2018).

É de extrema importância produzir meios de transportes, com baixas taxas de emissões de CO₂ e elevada reciclabilidade, principalmente no estágio atual em que todas as montadoras estão sendo pressionadas pela dependência do petróleo, ameaça das mudanças climáticas e pelos novos hábitos dos consumidores. Como veículos mais leves consomem menos combustíveis, potência de baterias e são menos poluentes, substituir materiais pesados pelo alumínio (dois terços mais leve que aço e infinitamente reciclável) nas linhas de montagem é uma alternativa eficaz e viável para corresponder a essas metas (ABAL CONTRIBUIÇÃO SUSTENTÁVEL, 2018).

A liga de alumínio 5083-O, especificamente, é bastante utilizada nas áreas da indústria automobilística, aeroespacial e naval devido a sua boa resistência mecânica e baixa densidade (TRONCI et al., 2011). O principal elemento de liga é o magnésio que se encontra com teores em torno de 4,5 % e além disso, é considerada não endurecida por tratamento térmico (METALS HANDBOOK, 1990).

Com o aumento da utilização de alumínio e suas ligas é necessário o desenvolvimento dos processos de soldagem, pois devido a algumas características desse material existem certas peculiaridades associadas aos processos de soldagem convencionais do mesmo. Com isso, processos que envolvam menores temperaturas, como a soldagem por fricção, demonstram ser bastante promissores quando associado a ligas de alumínio.

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica ou *Friction Stir Welding* (FSW) é uma técnica de união no estado sólido que pode reduzir defeitos como trincas, porosidades, entre outros que usualmente são

encontrados em processos de soldagem que envolvem fusão dos materiais. Além disso, devido ao seu menor aporte térmico esse processo provoca menores mudanças microestruturais, no caso do alumínio pode evitar o coalescimento ou dissolução de precipitados e até causar um refino da microestrutura, melhorando assim as propriedades da junta soldada em relação ao metal base (MISHRA, 2007).

Esse processo já vem sendo utilizado para união de alumínio em diversos setores, tais como, indústria naval, automobilística, aeronáutica e também na fabricação de componentes de trens de alta velocidade (ÇAM, 2011). O conceito do processo FSW é relativamente simples. Uma ferramenta não consumível com um design apropriado, contendo um pino e ombro, é inserida entre as chapas ou componentes a serem unidos e então se desloca transversalmente aos mesmos. O calor é fornecido através da fricção da ferramenta com o material e a deformação plástica do mesmo. O calor localizado plastifica o material em torno do pino e a combinação da rotação com o movimento transversal da ferramenta faz com que o material flua da frente para a parte posterior do pino. Como resultado deste processo é consolidada uma junta no estado sólido (MISHRA, 2007). Este processo alia as vantagens decorrentes do processo tecnológico e qualidade das soldagens obtidas a benefícios ambientais, resultantes da possibilidade de eliminar emissões nocivas de gases e radiações, características da generalidade dos processos de soldagem por fusão (JUNIOR et al., 2013).

Apesar deste processo de soldagem FSW aplicado as ligas de alumínio já estar bastante difundido internacionalmente, sendo encontrados muitos estudos e aplicações de algumas indústrias (GRIMM et al., 2015), no Brasil esse processo ainda tem poucas pesquisas, além do baixo número de aplicações industriais. Visto este cenário, se tornam importantes o estudo dos parâmetros e a análise das juntas soldadas pelo processo FSW como a temática abordada neste trabalho.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aplicar um método estatístico e matemático amparado por ensaios metalúrgicos e mecânicos para definir parâmetros de soldagem por fricção e mistura mecânica, para unir chapas com 6,35 mm de espessura da liga de alumínio AA5083-O, tendo como objetivos específicos:

- Definir parâmetros do processo FSW para a liga de alumínio AA 5083-O com chapas de 6,35 mm de espessura, utilizando o planejamento de experimentos Box-Behnken;
- Avaliar a influência das variáveis: rotação, velocidade de avanço e penetração da ferramenta, do processo de FSW na qualidade das juntas soldadas;
- Verificar a qualidade das juntas soldadas através da inspeção visual da superfície e de macrografias da seção transversal das soldas;
- Avaliar os efeitos dos parâmetros de processo sobre a evolução microestrutural e comportamento mecânico das juntas;
- Caracterizar metalurgicamente a melhor junta soldada obtida através da análise de sua microestrutura;

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio é o segundo elemento mais abundante na terra, depois do ferro é o metal mais consumido no mundo (TOTTEN et al., 2003), se tornou um grande potencial em aplicações de engenharia. Com a necessidade da indústria, exigindo características e propriedades que podem ser encontradas no alumínio e suas ligas, certamente, com o passar do tempo a utilização desse metal tende a aumentar (METALS HANDBOOK, 1990).

Como a maioria dos metais puros, o alumínio, tem baixa resistência, portanto normalmente não é utilizado, nessa condição, em aplicações nas quais é necessária boa resistência mecânica. Por isso, são adicionados elementos de liga, principalmente para aumentar a resistência. As resistências à tração variam bastante de acordo com os elementos de liga utilizados, que podem variar na faixa entre 45 MPa para a liga 1199-O a 700 MPa para 7075-T77. A baixa densidade combinada com altas resistências são as características que tem tornado o alumínio bastante atrativo para aplicações nas quais deseja se maximizar a razão resistência/densidade. Para aplicações estruturais, a liga com maior resistência e com boas propriedades como, resistência à corrosão, ductilidade, tenacidade, normalmente é selecionada dependendo da viabilidade econômica (TOTTEN et al., 2003). Algumas características físicas do alumínio estão expressas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas típicas para o alumínio.

Temperatura de fusão [°C]	660
Densidade [g/cm³]	2,70
Módulo de Elasticidade [MPa]	70000
Coefficiente de Dilatação Térmica [L/°C]	23.10-6
Condutibilidade Térmica a 25°C [Cal/cm/°C]	0,53
Condutibilidade Elétrica [%IACS]	61

Fonte: ABAL. Características químicas e físicas (2018)

As propriedades das ligas de alumínio dependem da interação da composição química e microestrutura obtida após solidificação, tratamento térmico e trabalho mecânico. Embora, alumínio puro seja muito resistente à corrosão devido a presença do filme de óxido de alumínio, a resistência a corrosão normalmente diminui com o aumento de adição de elementos de liga, tratamentos têm sido desenvolvidos para melhorar a resistência a corrosão de materiais com alto teor de liga (TOTTEN et al., 2003).

A nomenclatura utilizada para designar as ligas de alumínio, seus tratamentos térmicos e mecânicos segue padrões definidos por associações internacionais como a *Aluminum Association* (AA) e também por normas técnicas internacionais e nacionais como a ABNT NBR 6834:2006.

A norma ABNT NBR 6834 separa as ligas de alumínio entre aquelas que são fabricadas pelo processo de fundição e as que passam por trabalho mecânico. A Tabela 2 apresenta a nomenclatura das ligas para trabalho mecânico. A norma define as ligas de alumínio com quatro dígitos, sendo o primeiro representando qual o principal elemento de liga adicionado. O segundo dígito nas séries de 2xxx a 8xxx indica se a composição da liga é igual a desenvolvida originalmente (quando for zero) ou se a liga original sofreu alteração na sua composição química (algarismos de 1 a 9). O terceiro e quarto dígitos apenas diferenciam as ligas dentro de uma série de maneira a identificar uma liga específica (ABNT NBR 6834, 2006).

Tabela 2 - Principais elementos de liga das séries de alumínio.

Série	Principal elemento de liga
1xxx	Alumínio Al _≥ 99%
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos

Fonte: ABNT NBR 6834 (2006).

Além da designação de nomenclatura as ligas de alumínio ainda se dividem em tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente. A norma ABNT NBR 6835:2000 define como ligas de alumínio tratáveis termicamente aquelas cujo aumento de resistência mecânica é obtido através de um tratamento térmico apropriado. As ligas consideradas tratáveis termicamente são as das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx, enquanto as das séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são consideradas não tratáveis termicamente, ou seja, são endurecidas mais significativamente por deformação. Além disso, essa norma tem a finalidade de classificar as têmperas que são obtidas em ligas de alumínio. Conforme a Tabela 3 pode-se verificar a nomenclatura dos tratamentos aplicados e sua descrição (ABNT NBR 6835, 2000).

Tabela 3 - Nomenclatura de tratamentos realizados em ligas de alumínio.

Tratamento	Descrição
F	Como fabricado
O	Recozida ou recristalizada
H	Endurecimento por deformação
W	Solubilizado
T	Tratável Termicamente

Fonte: Adaptada da Norma ABNT NBR 6835, 2000.

As ligas de alumínio possuem um amplo campo de aplicação e está em crescimento em diversos setores. Dentre as principais aplicações das ligas de alumínio pode-se citar a construção civil em esquadrias e revestimentos. Além disso, o alumínio tem sido o material predominante em aviões com cerca de 80% em peso, principalmente devido ao desenvolvimento de ligas com altas resistências mecânicas. A indústria naval, com a melhoria das técnicas de soldagem e o desenvolvimento das ligas de alumínio e magnésio, que resistem à corrosão da água salgada, tem aumentado cada vez mais a utilização do alumínio neste ramo, permitindo a confecção de barcos, lanchas, navios e submarinos (ABAL, 2004).

Alguns dados interessantes sobre a substituição do aço nos transportes por alumínio são demonstrados nos itens a seguir:

- A cada 100 kg de redução de peso de um automóvel, cerca de 300 a 900 litros de combustível podem ser economizados durante todo o ciclo de vida do veículo. Em táxis e em ônibus urbanos, a economia é significativamente superior a 2.500 litros.
- Com diversas vantagens técnicas, econômicas e ambientais, cerca de 90% do alumínio presente nos veículos é recuperado e reciclado.
- Componentes automotivos de alumínio são tipicamente 50% mais leves e ainda garantem maior rigidez estrutural e segurança veicular que os fabricados com materiais mais pesados (ABAL, 2018).

Além das utilizações mais conhecidas estão sendo estudadas novas aplicações para alumínio e suas ligas devido, principalmente, ao fato da indústria de transportes ter que diminuir a emissão de poluentes e o consumo de combustíveis. Uma forma de garantir isso é reduzindo o peso dos automóveis, a utilização de ligas de alumínio na indústria automobilística cresceu em 80% nos últimos cinco anos (MILLER et al., 2000).

No trem de poder automotivo, alumínio fundidos têm sido utilizados para quase 100% dos pistões, cerca de 75% dos cabeçotes, 85% dos coletores de admissão e transmissão (outras peças-eixo traseiro, diferencial caixas e eixos de transmissão, etc). Para aplicações de chassis, carcaças de alumínio são usadas para cerca de 40% das rodas, e para suportes, componentes de freio, suspensão (controle braços, suportes), componentes de direção (suportes para airbags, eixos de direção, juntas, caixas, rodas) e painéis de instrumentos.

As ligas de alumínio abrangem uma grande variedade de composições químicas o que implica em diferentes faixas de dureza. Portanto, a técnica de preparação metalográfica varia consideravelmente. Ligas de menor dureza são geralmente mais difíceis de preparar pelo polimento mecânico pelos seguintes motivos: a deformação no corte e lixamento é mais profunda, a incorporação de partículas durante o polimento é mais provável de ocorrer, um despreendimento entre a matriz e as partículas de segunda fase, que são consideravelmente mais duras do que a matriz, ocorre mais facilmente durante o polimento. Ligas de maior dureza, embora mais fáceis de preparar, apresentam uma maior variedade de fases e complexidades na microestrutura. No entanto, existem métodos para contornar as dificuldades de preparar e analisar ligas de menor e maior dureza. Muitos métodos são gerais e se

aplicam a todos os metais, mas alguns foram desenvolvidos especificamente para ligas de alumínio.

O alumínio é um metal quimicamente ativo que deriva a sua estabilidade e resistência à corrosão a partir da formação de uma película protetora de óxido que impede a deterioração de superfícies polidas e atacadas. Filmes de óxido mais espessos do que o normal podem ser formados de uma maneira controlada, fazendo a peça de ânodo de uma célula eletrolítica. Estas películas podem ser utilizadas para revelar características microestruturais (METALS HANDBOOK, 1985).

Quando alguns tipos de películas anódicas são formadas sobre uma superfície e é examinada com luz polarizada alguns efeitos de contraste são produzidos revelando o tamanho de grão e as diferenças de forma e orientação (METALS HANDBOOK, 1985).

3.1.1 Ligas de Alumínio-Magnésio

Ligas de alumínio da série 5xxx (Al-Mg) são amplamente utilizadas na indústria automobilística, aeroespacial e naval devido a sua boa resistência mecânica e baixa densidade. Quando é usado como um elemento importante de liga ou com manganês, o resultado é uma liga de moderada a alta resistência (TRONCI et al., 2011).

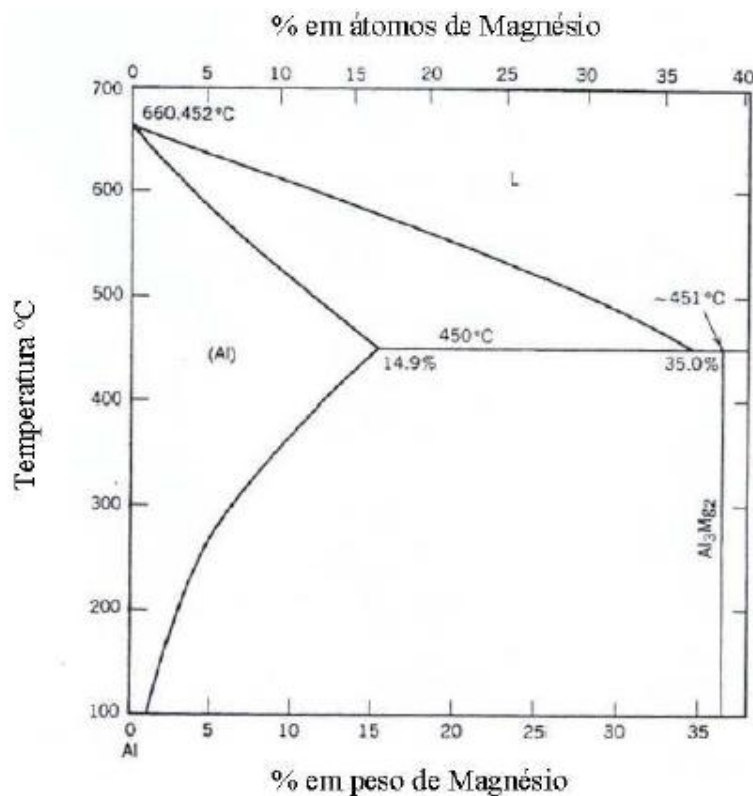
O magnésio é consideravelmente mais eficaz para elevar a dureza que o manganês, cerca de 0,8% de Mg é o equivalente a 1,25% de Mn, e pode ser adicionado consideravelmente em quantidades maiores. As ligas desta série possuem boas características de soldagem e boa resistência à corrosão em atmosferas marítimas. No entanto, certas limitações devem ser impostas à quantidade de trabalho a frio e as temperaturas operacionais seguras permitidas para ligas com altas quantidades de magnésio (acima de 3,5% para temperaturas operacionais acima de 65°C) para evitar a susceptibilidade a geração de trincas causadas por corrosão sob tensão (DAVIS, 2001).

Como referido anteriormente, o magnésio é o principal elemento de liga na série de ligas 5xxx sobre o mesmo pode-se citar alguns de seus efeitos quando adicionados às ligas de alumínio. Sua máxima solubilidade, no estado sólido, em alumínio é de 17,4%, mas o teor de magnésio nas ligas forjadas

atuais não excede 5,5%. Os precipitados de magnésio se formam preferencialmente nos limites de grãos como uma fase altamente anódica (Mg_5Al_3 ou Mg_5Al_8), o que produz susceptibilidade a corrosão intergranular e corrosão sob tensão. Ligas forjadas contendo até 5% de Mg, devidamente fabricadas, são estáveis sob o uso normal. A adição de magnésio marcadamente aumenta a resistência do alumínio sem diminuir indevidamente a ductilidade (DAVIS, 2001).

O sistema de alumínio-magnésio pode fornecer excelentes combinações de resistência mecânica, à corrosão por solução sólida e endurecimento de trabalho mecânico. O diagrama de fases do sistema Al-Mg está representado na Figura 1, embora em princípio este diagrama exiba um solvus positivamente inclinado, uma condição necessária para um sistema de endurecimento por precipitação. Os precipitados de Al_3Mg_2 impediram a comercialização de ligas de alumínio-magnésio tratáveis termicamente, a menos que contenham silício, cobre ou zinco suficientes para formar precipitados do tipo Mg_2Si , Al-Cu-Mg ou Al-Zn-Mg.

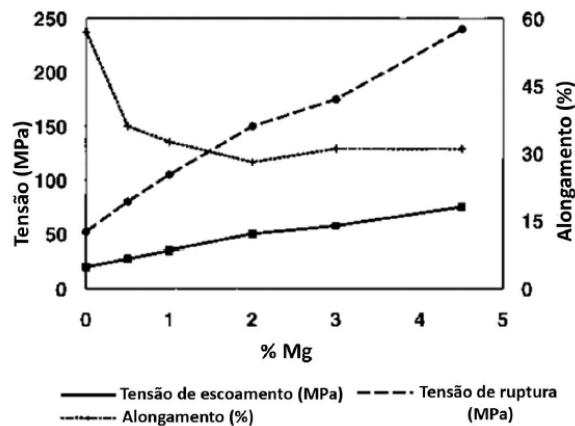
Figura 1 – Diagrama de fases Al-Mg.



Fonte: METALS HANDBOOK (1992)

A Figura 2 apresenta o efeito do magnésio quando adicionado a ligas Al-Mg recozidas. As tensões de escoamento e ruptura aumentam com a adição de magnésio, porém o alongamento tem efeito contrário, ele decai drasticamente, mesmo para pequenas quantidades de Mg.

Figura 2 - Efeito da adição de magnésio em solução sólida nas propriedades mecânicas de ligas binárias Al-Mg no estado recozido.



Fonte: adaptada de (TOTTEN et al., 2003)

3.1.2 Ligas de Alumínio AA 5083

As ligas da família AA5083 não apresentam endurecimento por tratamento térmico. Sua composição química é definida como 4 a 4,9% de Mg e 0,4 a 1,0% em peso de Mn. Uma composição típica seria 4,7 % de Mg, 0,8% de Mn e 0,1% de Cr, com níveis residuais de Fe e Si. Seus limites máximos de composição podem ser observados na Tabela 4. É uma liga relativamente barata com resistência mediana, excelente comportamento a frio, boa soldabilidade e resistência à corrosão. A liga pode ser processada para dar um grau moderado de superplasticidade, este fato leva a combinação de características que ocasionou sua crescente utilização em condições de severas deformações plásticas (*superplastic forming* - SPF) de uma série de peças para aplicações não estruturais que não envolvem tensões residuais geradas pela conformação.

Tabela 4 - Limites máximos de composição de cada elemento para ligas de alumínio AA 5083.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros*	Total	Al
									máximo*	
0,40	0,40	0,10	0,40	4,0	0,05	0,25	0,15	0,05	0,15	Balanço
			a 1,0	a	a					
				4,9	0,25					

Fonte: METALS HANDBOOK, 1990.

A resistência mecânica dessa liga, dentre as ligas de alumínio, é considerada mediana, porém apresenta ótima resistência à corrosão e ductilidade. Por isso, trabalhos têm sido realizados para o desenvolvimento de técnicas para o refino microestrutural dessa liga, as quais de acordo com a relação de Hall-Petch aumentaria a resistência mecânica (VALIEV, 2010). Este refinamento microestrutural pode ser atingido através de deformação plástica severa, processamento termomecânico ou rápida solidificação. Tokarski (2012) estudou a influência da solidificação rápida na liga 5083 e verificou que a microestrutura ficou mais refinada, a resistência mecânica do material foi maior e esses fatores não afetaram a sua plasticidade (TOKARSKI, 2012). A Tabela 5 mostra típicos valores de resistência e alongamento para essa liga. Os valores variam de acordo com o tratamento térmico e trabalho mecânico aplicado ao material.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas típicas da liga de alumínio AA 5083.

Tratamento Térmico	Tensão máxima [MPa]	Tensão escoamento [MPa]	de Alongamento [%]
O	290	145	22
H112	303	193	16
H116	317	228	16
H321	317	228	16
H323, H32	324	248	10
H343, H34	345	283	9

Fonte: METALS HANDBOOK, 1990.

A liga AA 5083-O por ser uma liga recozida, normalmente apresenta grãos equiaxiais homogeneamente distribuídos com a presença de partículas de segunda fase. Os precipitados primários de $MnAl_6$ são cinzas e os menores e mais escuros provavelmente são partículas de segunda fase que possuem magnésio (METALS HANDBOOK, 1985).

As principais aplicações dessa liga estão na indústria naval, automobilística, aeronáutica, torres de televisão, equipamentos de transportes, aplicações criogênicas, entre outras. Em geral utilizada em situações que exijam uma moderada soldabilidade e boa resistência à corrosão (METALS HANDBOOK, 1990).

3.1.3 Soldagem das ligas de Alumínio

A metalurgia da soldagem e os processos utilizados para soldar alumínio avançaram significativamente nos últimos 20 anos. Muitos aspectos que eram considerados limitantes, como a remoção do óxido, agora já são contornados mais facilmente. É pertinente a importância das etapas de preparação anterior a solda e a qualidade dos consumíveis (gás e metal de adição), no entanto, novas técnicas têm sido desenvolvidas para facilitar esses fatores (TOTTEN et al., 2003).

O metal de solda de alumínio tem uma característica diferente dos aços, pois não há transformação de fases no estado sólido devido ao resfriamento. Portanto, sua microestrutura é definida somente pela solidificação. Além disso, o alumínio é bastante suscetível a defeitos como porosidade e trincas de solidificação. Métodos de simulação de soldas para alumínio têm tornado mais fácil de entender o efeito dos parâmetros, dos elementos de liga na microestrutura, assim auxiliando no estudo para evitar a formação de defeitos (TOTTEN et al., 2003).

Nas soldas de alumínio normalmente o metal de solda e a zona afetada pelo calor são as partes menos resistentes. Além disso, o conceito de soldas com melhores propriedades que o material base que pode ocorrer em aços não é aplicável, em métodos convencionais, para ligas de alumínio. Normalmente, as resistências das soldas de ligas de alumínio são 50% em comparação ao material base (METALS HANDBOOK, 1993). Modelamento de crescimento de

precipitados e dissolução na zona afetada pelo calor permitem prever e otimizar as propriedades mecânicas. O desenvolvimento de novos metais de adição também tem aumentado a eficiência das uniões soldadas de ligas de alumínio (TOTTEN et al., 2003).

O alumínio pode ser unido por diversos processos, inclusive por processos que envolvam fusão, por resistência elétrica, colagem por adesivo, métodos mecânicos com rebites e parafusos. Algumas propriedades que afetam a soldabilidade desse material são:

- Formação de óxido de alumínio;
- Alta condutividade térmica;
- Coeficiente de expansão térmica;
- Características de fusão;
- Absorção de gases;

O óxido de alumínio forma em superfícies de alumínio expostas ao ar. Antes de realizar a soldagem de alumínio por métodos de fusão, a camada de óxido deve ser removida mecanicamente, por usinagem, polimento, escovagem, raspagem ou limpeza química. Se os óxidos não são removidos, fragmentos de óxido podem ser aprisionados na solda e irá causar uma redução da ductilidade, uma falta de fusão, e, possivelmente, acarretando em uma falha na solda. Durante a soldagem, o óxido deve ser impedido de se formar novamente protegendo a área conjunta com um gás não oxidante, tal como argônio, hélio, ou quimicamente através da utilização de fluxos.

A condutividade térmica é a propriedade física que mais afeta a soldabilidade do alumínio. A condutividade térmica das ligas de alumínio é metade da do cobre e quatro vezes a de um aço baixo carbono. Isso significa que o calor deve ser fornecido quatro vezes mais rapidamente para o alumínio do que para ligas de aço para atingir uma certa temperatura localmente para a mesma quantidade de material. No entanto, a alta condutividade térmica das ligas de alumínio ajuda a solidificação da poça de fusão e, conseqüentemente, facilita a soldagem em posições mais complexas (METALS HANDBOOK, 1990) (GIVI; ASADI, 2014).

O ponto de fusão do alumínio e suas ligas é consideravelmente mais baixo que o de metais como cobre e aço. Obviamente a quantidade de calor

para atingir a temperatura necessária para soldagem desse material é menor do que aquela para materiais com maiores pontos de fusão (METALS HANDBOOK, 1990).

Devido a essas e outras características da soldagem de alumínio e suas ligas o processo de soldagem por fricção se torna uma alternativa muito favorável para esse material. Visto que esse tipo de processo não envolve a fusão do metal base e na maioria dos casos não é necessário material de adição, mais detalhes sobre esse tipo de processo será visto no próximo capítulo.

3.2 Processos de união no estado sólido

Soldagem e união de materiais é um passo importante na fabricação de estruturas integradas. A maioria dos processos de soldagem convencional envolve fusão no local de solda e posterior solidificação e assim consolidando a união. A seleção do processo de união adequado depende do tamanho e design das estruturas. Enquanto grandes aviões utilizam a união mecânica, os navios utilizam técnicas de soldagem. Sistemas menores, como automóveis, utilizam uma grande variedade de técnicas como soldagem e união por adesivos (DIXON, 1994).

Processos de união de materiais podem ser divididos em quatro categorias. Soldagem por fusão, brasagem, união por adesivos e união no estado sólido. Nos processos de soldagem por fusão uma porção do material base funde e um material de adição é introduzido e assim quando solidificados formarão a junta consolidada (DIXON, 1994).

Brasagem é o processo no qual apenas o metal de adição funde. O metal de adição é inserido entre os metais de base e quando solidificado produz a união. Na união por adesivo, o material de enchimento é um polímero em vez de um metal. Os processos de união em estado sólido dependem da deformação e da difusão de átomos para produzir a união, sem fusão do metal de base ou do metal de adição (WAINER, 1992).

Nos processos de soldagem no estado sólido, pressão e deformação proporcionam uma parte importante da união. Geralmente, a temperatura de fusão do material base não é atingida e não é necessário material de adição. A

soldagem por difusão, normalmente, utiliza uma pressão que é grande o suficiente para deformar apenas localmente e fazer com que ocorra a união efetiva entre as superfícies. Em seguida, a uma temperatura elevada, mas abaixo da temperatura de fusão da peça de trabalho, é permitido que os átomos se difundam através da interface para preencher quaisquer vazios remanescentes e completar o processo de união (MISHRA, 2007).

Os processos de união por deformação utilizam altas pressões, causando grandes deformações, fazendo com que os átomos de uma superfície entrem em contato íntimo com os átomos da segunda superfície. A pressão pode ser fornecida por vários métodos, incluindo soldagem a frio, soldagem explosiva, solda forja, soldagem a quente, soldagem por rolo, soldagem por ultra-sons e soldagem por fricção.

A soldagem por fricção é única entre os processos de estado sólido baseados na deformação devido à forma como os fluxos de material se juntam para produzir a união soldada. Se realizada apropriadamente, pode acarretar em propriedades muito boas, e em muitos casos até superiores a do material base e isso tem sido a principal razão para a sua implementação em numerosas aplicações como nas indústrias aeroespacial, automotiva e naval (MISHRA, 2007).

3.2.1 Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica ou *Friction Stir Welding* (FSW)

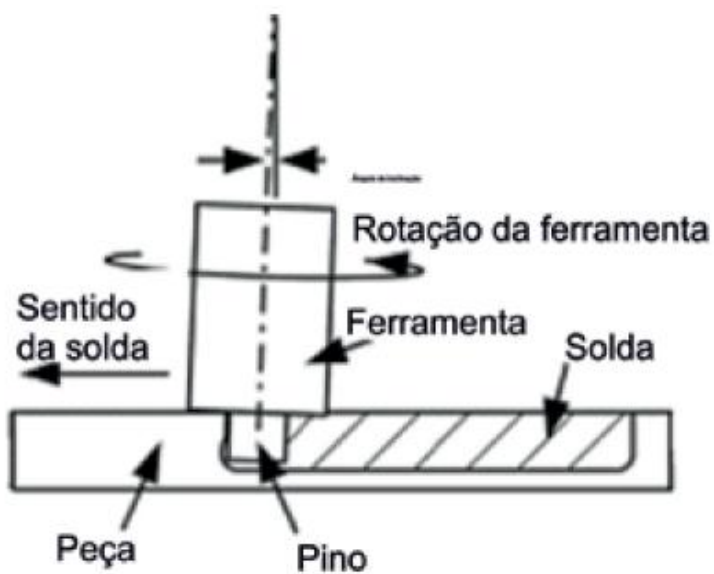
A soldagem por fricção e mistura mecânica ou *Friction Stir Welding* (FSW) é um processo que foi inventado em 1991 no Reino Unido mais precisamente no *The Welding Institute* (TWI) (THOMAS et al., 1997) (THOMAS et al., 1991). Esse processo é energeticamente eficiente, ambientalmente amigável e versátil. Particularmente, bastante utilizado para ligas de alumínio endurecidas por precipitação as quais há maiores dificuldades em utilizar processos de soldagem convencionais (MISHRA, 2007).

A dificuldade em fazer uniões com alta resistência mecânica e à fadiga e de ligas utilizadas na indústria aeronáutica, como as séries de ligas de alumínio 2xxx e 7xxx, tem inibido a utilização de soldagem convencional nessa área. Essas ligas são consideradas não soldáveis devido à microestrutura frágil

formada após a solidificação além de outros defeitos como a porosidade na zona de fusão. Além disso, a perda de resistência mecânica quando comparado com o metal base é bastante significativa. Esses fatores tornam a soldagem desses materiais por métodos convencionais pouco atrativa. Algumas ligas são soldadas pelo método de soldagem por resistência, mas com a devida preparação da superfície o que torna o processo mais caro (MISHRA, 2007).

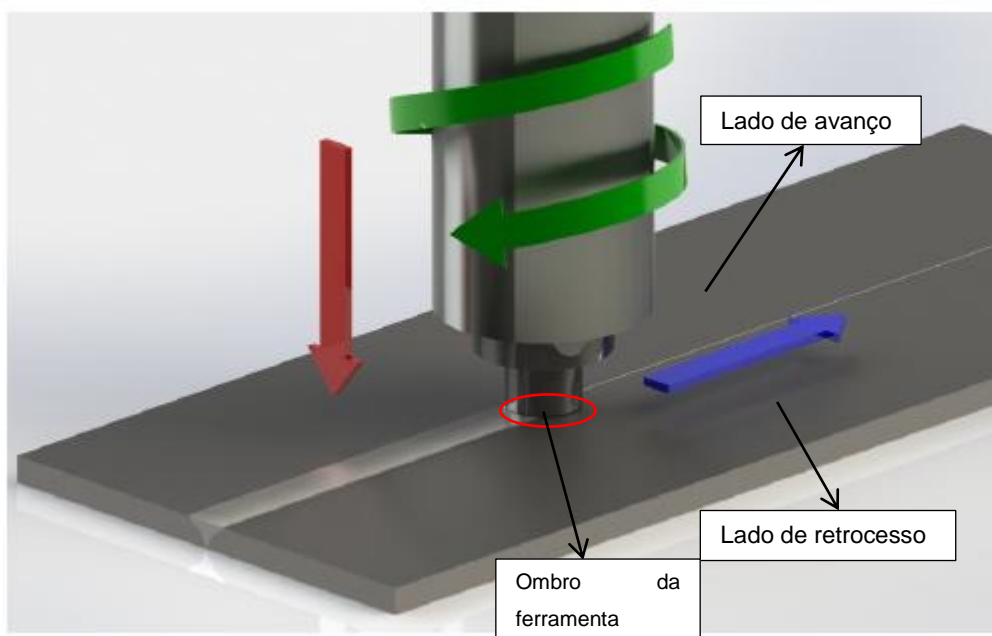
O conceito do processo FSW é baseado na união com o uso de uma ferramenta rotativa, não consumível e com um design apropriado (Figura 3). A maioria das ferramentas utilizadas no mercado é caracterizada por conter uma redução na sua extremidade, sendo denominados por pino e ombro. Com a ferramenta em rotação o pino é inserido entre duas chapas ou componentes a serem unidos até a altura do ombro. Após a entrada da ferramenta é realizado o movimento transversal aos mesmos (Figura 4). A ferramenta tem duas funções principais e fundamentais: o aquecimento das peças e promover a mistura dos materiais a fim de consolidar a união. O calor é fornecido através da fricção da ferramenta com o material e a deformação plástica do mesmo. O calor localizado plastifica o material em torno do pino e a combinação da rotação com o movimento transversal da ferramenta faz com que o material flua da frente para a parte posterior do pino. Como resultado deste processo é consolidada uma junta no estado sólido (MISHRA, 2007).

Figura 3 - Desenho esquemático demonstrando mais detalhes sobre a ferramenta utilizada no processo.



Fonte: (CERVEIRA, 2008)

Figura 4 - Desenho esquemático do processo FSW.



Fonte: adaptado de (WALTER, 2017)

Durante o processo o material é submetido a uma intensa deformação plástica a uma temperatura elevada o que resulta em uma microestrutura refinada e recristalizada. Essa microestrutura gerada promove boa resistência mecânica às juntas desse processo (MISHRA, 2007).

O processo FSW do ponto de vista operacional consiste em quatro etapas: a fase de imersão da ferramenta, sua permanência no local de entrada para aquecimento da mesma e das peças de trabalho (*dwell time*), o avanço da ferramenta na qual a solda é consolidada e a saída da ferramenta. Esse processo possui várias vantagens e benefícios em relação, principalmente, a processos convencionais, como pode ser visto nos itens abaixo:

Benefícios Metalúrgicos

- Processo que ocorre no estado sólido;
- Baixa distorção;
- Boa estabilidade dimensional e repetibilidade;
- Sem perda de elementos de liga;
- Excelentes propriedades mecânicas na junta soldada;
- Recristalização da microestrutura;
- Ausência de trincas de solidificação;
- Possibilidade de soldar todas as ligas de alumínio;

Benefícios ambientais

- Não é necessário gás de proteção;
- Mínima limpeza da superfície é necessária;
- Elimina desperdício de lixas;
- Elimina solventes necessários para desengorduramento;
- Economia de materiais de consumo como, arames, gases;
- Sem emissão de gases nocivos;

Benefícios energéticos

- Melhoria nos materiais utilizados permitindo redução no peso;
- Diminui o combustível necessário em aviões, automóveis e navios;

3.2.2 Processo de FSW em ligas de alumínio

O processo FSW aplicado a ligas de alumínio tem sido o foco principal, por isso possui muitos estudos e pesquisas na área, sendo esse material um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento do processo e, portanto, atualmente, o mais utilizado (KUMBHAR; DEY, 2011).

A utilização do processo teve sua primeira aplicação comercial na indústria naval, no ano de 1996, em uma empresa sueca SACA. Essa empresa adotou o processo FSW para realizar a soldagem de painéis de alumínio com 4,5 mm de espessura, para câmaras de congelamento em barcos pesqueiros (KALLEE, 2009).

Na indústria automobilística é interessante a aplicação do processo FSW em ligas de alumínio, pois pode ser utilizado tanto em componentes estruturais quanto em peças e componentes internos (TAYLOR; HORI; HINO, 2010). Outra aplicação nessa área são as chamadas *tailored welded blanks* que consiste na união de chapas de materiais similares ou dissimilares, com espessuras e propriedades mecânicas diferentes formando uma geratriz para posterior estampagem (LEITÃO et al., 2009). Tronci (2011) obteve sucesso na união de chapas de AA 5182-H1111 com AA5083-H1111 com espessuras de 1 mm sendo que as juntas ficaram com propriedades mecânicas semelhantes e até superiores ao metal base.

As ligas de alumínio consideradas não endurecidas por tratamentos térmicos tendem a não apresentar muitos problemas em relação a zona afetada pelo calor, principalmente quando não são trabalhadas a frio. As mesmas não passam por uma transformação de estado sólido e, portanto, o efeito do ciclo térmico durante a soldagem é pequeno, e as propriedades dessa zona são quase não afetadas pelas condições do processo de soldagem FSW. Eventualmente pode ocorrer um pequeno crescimento do grão nesta região, mas esse fato normalmente não altera significativamente as propriedades. Por outro lado, se por acaso houver uma fusão localizada do metal pode levar à segregação do soluto na zona de mistura, o que resulta em uma perda de resistência. Porém, essa perda é insignificante se a liga soldada está na condição recozida (MISTIKOGLU, 2014).

Apesar de as ligas de alumínio não tratáveis termicamente serem mais facilmente soldadas pelos processos convencionais, ainda assim essas ligas apresentam características pertinentes do alumínio, como, por exemplo, a camada de óxido, alta condutividade térmica, alto coeficiente de expansão térmica, entre outros inconvenientes. Ainda, apresentam uma forte tendência de apresentar porosidade na zona de fusão quando soldadas por esses tipos de processos.

Threadgill (2013) cita algumas vantagens do processo FSW aplicado a ligas de alumínio:

- Por ser um processo no estado sólido pode ser aplicado a todas as ligas de alumínio e ainda diminuindo os problemas como, trincas de solidificação, porosidade, problemas comuns a soldagem por fusão;
- Processo automatizado assim não necessitando mão de obra especializada;
- A ausência de fusão do material acaba diminuindo o problema associado a dilatação e contração do mesmo, causando menor distorção;
- Processo flexível pode ser aplicado em diversas posições de soldagem, como, por exemplo, juntas de topo, juntas T, sobrepostas;
- Em geral, resulta em boas propriedades mecânicas;
- A energia necessária para reproduzir as juntas fica entre o processo de soldagem a laser (necessita menor energia) e o processo MIG (tipicamente necessita maior quantidade de energia);

3.2.3 Evolução Microestrutural e Propriedades mecânicas das Soldas FSW

A evolução da microestrutura das soldas determina as características das mesmas, por isso agora será discutido esse tópico especificamente para ligas da série 5xxx.

De forma geral, a razão entre velocidade de avanço e a rotação (F/S) quando utilizados no processo valores baixos resultam em maiores resultados

para resistência a tração do material, pois significa maior distribuição térmica no processo (D'URSO et al., 2017).

As ligas da série 5xxx são soluções sólidas com adição de magnésio (Mg) como principal elemento de liga. A máxima solubilidade de Mg no alumínio é de 14,9% a 450°C o que determina o limite superior de endurecimento dessas ligas. O quanto terá de ganho de resistência vai depender do tratamento combinado com o trabalho a frio e tratamento térmico. Além disso, a série 5xxx é composta por uma única fase, embora possa haver a presença de precipitados do tipo Al_3Mg_2 e Al_6Mn dispersos na matriz. A fase Al_3Mg_2 se forma tanto no contorno de grão quanto dentro, causando diminuição preferencial de Mg no contorno de grão. A fase Al_6Mn se origina durante a fusão na extração de alumínio e é insolúvel no estado sólido se tornando uma barreira para o crescimento de grão em altas temperaturas. Além do mais, dependendo da composição da liga (especialmente Fe e Si) outras fases secundárias podem se formar.

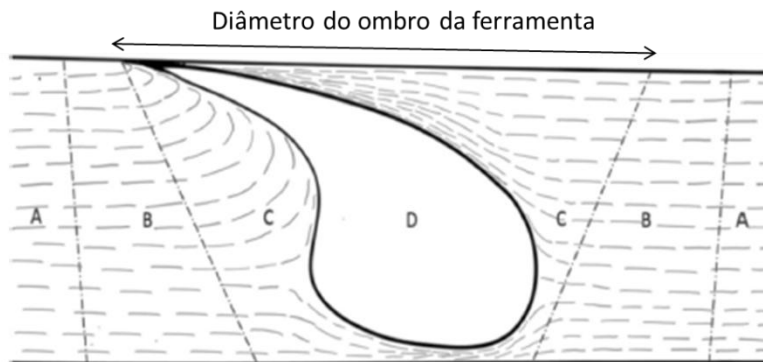
A liga AA 5083-O após ser soldada pelo processo FSW resulta em uma zona de mistura recristalizada e um aumento da fração de precipitados $Al_6(MnFe)$ pode ser observado. Este crescimento e precipitação dessas fases é atribuído às temperaturas atingidas durante o processo de soldagem (MISHRA, 2007).

Peel et al. (2003) investigaram as estruturas nos contornos de grãos da liga AA5083-H19 (trabalhada a frio) e foi observado que o processo FSW leva a uma recristalização dinâmica da microestrutura da região de mistura. Em regiões além da de mistura (5 mm de cada lado incluindo ZTMA), a microestrutura consiste na recristalização dinâmica original da microestrutura que é devido ao tratamento inicial da liga. A densidade de discordâncias dessa liga com esse tratamento é maior que combinado com as condições de temperatura do processo FSW e recristalização na zona de mistura e arredores (PEEL et al., 2003). Investigações semelhantes na liga AA5083-O revelam a presença de recristalização dinâmica apenas na zona ZTMA (SATO et al., 2001).

A Figura 5 apresenta as regiões típicas de uma junta transversal soldada pelo processo FSW. As principais zonas são a do material base (A), ou seja, a parte que não é afetada pelo processo, a zona afetada pelo calor (ZAC)

representada na Figura 5 pela letra B, a zona termomecanicamente afetada (C) a qual fica mais próxima da zona de mistura e por fim a zona de mistura (D) típica de juntas soldadas pelo processo FSW (THREADGILL, 2013).

Figura 5 - Desenho esquemático das regiões típicas de uma junta transversal soldada por FSW, sendo: A- Material Base (MB), B- Zona Afetada pelo Calor (ZAC), C- Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA) e D- Zona de Mistura (ZM).

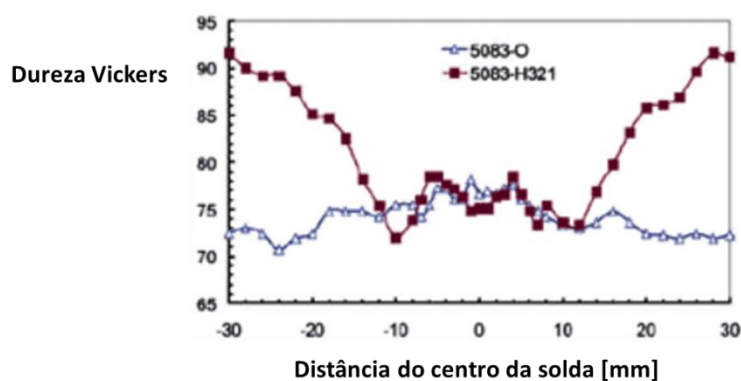


Fonte: adaptado (THREADGILL, 1999)

Estudos microestruturais foram realizados em ligas não tratáveis termicamente, utilizando as seguintes: 1100, 5083, 5754, 5251 e 5182. Soldas foram feitas em ambos os estados apenas recozidas (O) e em algumas trabalhadas mecanicamente. Macroscopicamente, as soldas nestas ligas parecem semelhantes às soldas em ligas tratáveis termicamente, exibindo ZTMA e ZM recristalizada. O perfil de dureza das ligas não tratáveis termicamente endurecidas por trabalho mecânico (por exemplo, 5xxx ligas nas condições H1xx, H2xx ou H3xx) normalmente se assemelham ao mostrado na Figura 6. À medida que se aproxima da região de solda, o calor do processo faz com que o recozimento e a recuperação ocorram, levando a uma queda na dureza. O mínimo de dureza é tipicamente na ZM, onde é formada a estrutura de grão fino, totalmente recristalizada. No entanto, soldas feitas em material recozido (na condição O) não exibem uma ZAC. Perfis de dureza mostram pouca ou nenhuma variação na dureza entre o metal base e a solda (Figura 6). Por vezes, a ZM pode até ter um pouco mais de dureza do que a condição O, devido ao pequeno endurecimento (quente) do trabalho e ao refinamento do grão. Uma vez que a formação da ZM modifica totalmente a microestrutura de

deformação prévia em material trabalhado a frio, a dureza dessa região é independente da condição original (KUMBHAR; DEY, 2011).

Figura 6 - Perfil de dureza da secção transversal de uniões soldadas pelo processo FSW das ligas AA5083-O e AA5083-H321.



Fonte: adaptada de (KUMBHAR; DEY, 2011).

A norma ISO 25239-5 2011 “*Quality and Inspection requirements*” descreve como devem ser realizadas as soldas e quais os procedimentos seguir para realizar os ensaios mecânicos. Vários estudos têm mostrado que a resistência mecânica de uniões soldadas pelo processo FSW é tão igual ou superior àquelas obtidas pelos processos de soldagem que envolvem fusão. Normalmente, nos processos de soldagem convencionais, as propriedades mecânicas da junta são determinadas pelo metal de adição que geralmente não é a mesma composição do metal base e, portanto não possui a mesma resistência mecânica (KUMBHAR; DEY, 2011).

3.2.4 Defeitos na Soldagem FSW

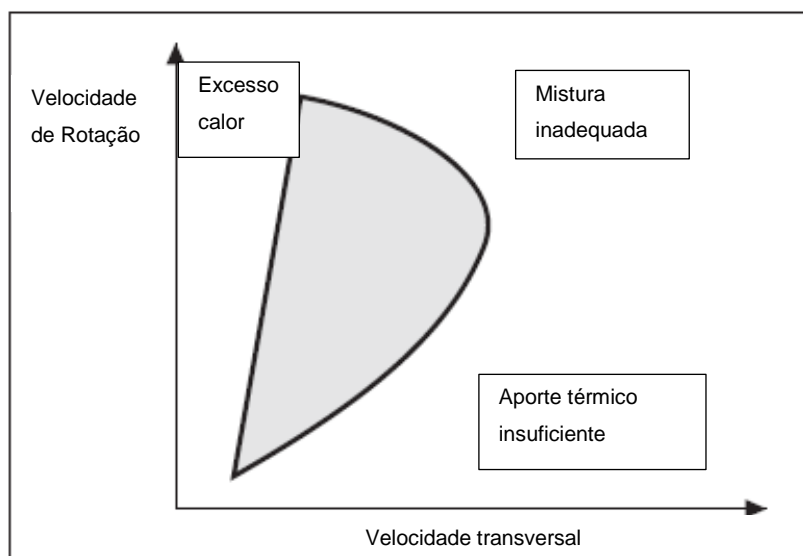
Como em todos os processos de soldagem, a otimização de parâmetros utilizados para a soldagem do processo FSW é de extrema importância, pois a utilização de parâmetros inadequados geralmente leva a geração de defeitos na junta soldada, assim comprometendo sua qualidade (PODRZAJ; JERMAN; KLOBCAR, 2015).

A energia atingida no processo é determinada majoritariamente por dois principais parâmetros, o primeiro é a rotação da ferramenta e o segundo é a

velocidade de avanço da mesma durante a soldagem. Outros fatores importantes são o material da ferramenta e sua geometria. A energia inadequada para o processo pode gerar uma grande variedade de defeitos, como, falta de penetração, vazios (*voids*), cavidade superficial, rebarbas excessivas, rugosidade superficial, falta de preenchimento interno ou defeito do tipo *groove*, pequenas fissuras ou também chamado de *kissing bond* (PODRZAJ; JERMAN; KLOBCAR, 2015).

Os defeitos mais comuns do processo estão normalmente divididos de acordo com aporte térmico de cada solda. Geralmente, o excesso de rebarbas está associado a um alto aporte térmico. Vazios e falta de preenchimento são causados pela falta de energia, ou também pela mistura inadequada do material durante o processo (PODRZAJ; JERMAN; KLOBCAR, 2015). O gráfico da Figura 7 representa um gráfico da energia atingida no processo em função dos dois principais parâmetros responsáveis por esse fator no processo: rotação e velocidade de avanço. Pode-se observar que valores de rotação muito altos associados a velocidades de avanços baixos geram muito calor ao processo. Também pode ser verificado que há uma janela de parâmetros ótimos para o processo no qual não há excesso nem falta de energia, além de mistura inadequada (KIM et al., 2006).

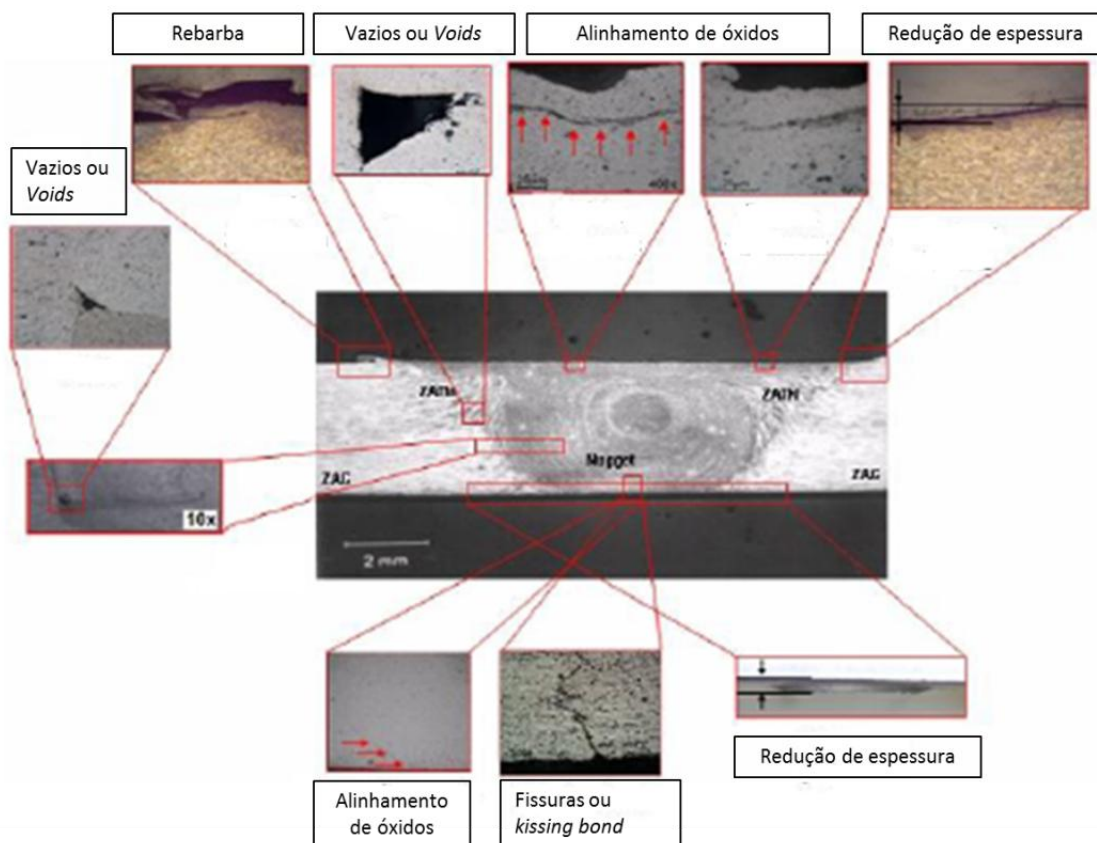
Figura 7 - Janela de parâmetros ideais do processo FSW.



Fonte: adaptado de (KIM et al., 2006).

Na Figura 8 podem ser observados alguns dos defeitos típicos do processo FSW e suas principais características. Os defeitos podem ocorrer por diversas causas, que podem ser a falta de penetração da ferramenta, forças inadequadas ao processo, geometria e material da ferramenta inadequados (SANTOS et al., 2008).

Figura 8 - Típicos defeitos de juntas soldadas pelo processo FSW.



Fonte: adaptado de (SANTOS et al., 2008)

3.2.5 Definição de parâmetros do processo FSW

Uma vez definidas as características da ferramenta para a soldagem, a seleção dos parâmetros é o próximo passo. A literatura publicada demonstra que não existe um consenso sobre a melhor forma de se encontrar os parâmetros ideais para uniões soldadas pelo processo FSW (PRADEEP, MUTHUKURAMAN, 2013) (RAJAMANICKAM, BALUSAMY, 2008) (SIVA et al., 2016). Porém, a escolha dos parâmetros segue alguns objetivos claros, como, maximizar a qualidade da junta soldada e produzir soldas livres de defeitos.

A avaliação desses parâmetros pode ser mensurada através da resistência mecânica da junta soldada comparada com a do metal base. Para a verificação de defeitos da solda podem ser utilizadas técnicas de ensaios não destrutivos, como, por exemplo, ultrassom. O tempo de soldagem é importante principalmente para aplicações nas quais há uma grande demanda de soldas, como na construção de navios e indústria aeronáutica.

(D'URSO et al., 2017) em seus estudos para as ligas AA2024 e AA7075 encontraram melhores propriedades mecânicas para os parâmetros intermediários utilizados, com a rotação de 1500 rpm e avanço de 35 mm/min. Para a liga AA 7075 os valores de resistência máxima das juntas soldadas chegaram próximos a 400MPa.

A qualidade da junta soldada depende basicamente da energia obtida no processo e da mistura adequada dos materiais. Além de geometria e material da ferramenta, os parâmetros do processo são de grande importância para o controle da energia do processo. O trabalho de (SREE SABARI; MALARVIZHI; BALASUBRAMANIAN, 2016) estuda a influência da rotação na união de juntas soldadas pelo processo FSW da liga AA2519-T87, assim fixando todas as outras variáveis e apenas variando a rotação o estudo conclui que rotações maiores que 1500 rpm produzem defeitos na zona de mistura, associando esse resultado a maior força de atrito e ao alto aporte térmico que causa uma mistura de material inadequada.

Para o auxílio nesse processo de otimização de parâmetros pode-se utilizar as técnicas de Planejamento de Experimentos ou também chamados *Design of Experiments* (DOE). Essas contribuem com economia de tempo e material.

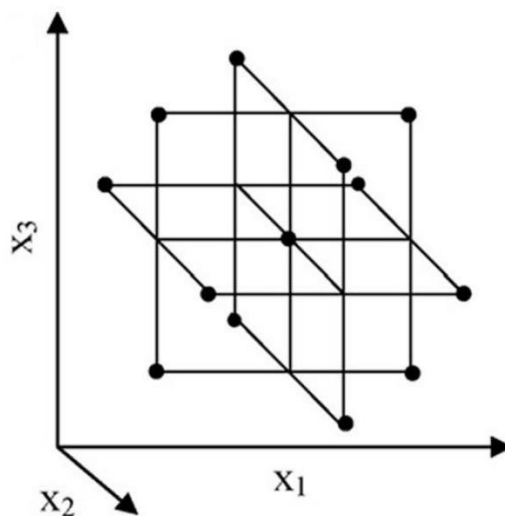
Alguns trabalhos já vêm utilizando esses métodos no processo FSW, a fim de obter os melhores parâmetros para soldas com boa qualidade. Como, por exemplo, isentas de defeitos, com boa resistência mecânica. Koilraj et al. (2012) utilizou o método Taguchi para otimizar parâmetros de uniões dissimilares das ligas AA2219 e AA5083. Kadaganchi et al. (2015) utilizaram a metodologia de superfície de resposta em cinco níveis para encontrar qual combinação de parâmetros que correspondia a máxima resistência à tração. O desenvolvimento desses estudos demonstra grande confiabilidade dos resultados dos modelos teóricos com os obtidos em ensaios.

3.3 Projeto de Experimentos Box-Behnken

O Projeto de Experimentos Box-Behnken (BBD), é uma Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), esse tipo de método é uma combinação de técnicas estatísticas e matemáticas para o desenvolvimento, aperfeiçoamento e otimização de processos. As maiores aplicações desses métodos estão relacionadas à pesquisa e ambiente industrial, particularmente em situações as quais muitas variáveis influenciam no desempenho da resposta analisada (MONTGOMERY, 1991).

Essa ferramenta BBD oferece três níveis (-1,0,+1) para cada fator e é baseado em um projeto de experimentos fatorial incompleto de três níveis (FERREIRA et al., 2007). Entretanto, é válido ressaltar que esse planejamento não testa condições experimentais extremas, como, por exemplo, as condições representadas por (+1,+1,+1) e (-1,-1,-1). Esses pontos representam vértices de um cubo e foram descartados do planejamento 3^3 original para assim obter a matriz experimental Box-Behnken. A representação gráfica para o planejamento usado na otimização de três variáveis é mostrado na Figura 9 (PAULA et al., 2017). Os experimentos necessários para o BBD de três fatores estão apresentados na Tabela 6.

Figura 9 - Representação gráfica do planejamento Box-Behnken para três variáveis.



Fonte: (RANADE; THIAGARAJAN, 2017)

Tabela 6 - Combinações de parâmetros do BBD aplicado a três fatores.

Corrida	Fator Estandarizado		
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fonte: O Autor

Essa técnica tem sido utilizada em alguns estudos para otimização de parâmetros do processo de soldagem por fricção, bem como correlacionar os resultados obtidos com os parâmetros utilizados (ZHANG; LIU, 2013) (SIVA et al., 2016). Padmanaban et al. (2015) estudaram o efeito dos parâmetros na resistência à tração de uniões soldadas pelo processo *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) da liga AA6061, através do DOE foi possível ser estabelecido os parâmetros os quais a união soldada atingiria a maior resistência mecânica, no trabalho foram obtidos os seguintes parâmetros: rotação de 1265 rpm, um tempo de pré-aquecimento de 30 segundos e diâmetro do ombro de ferramenta de 15 mm.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

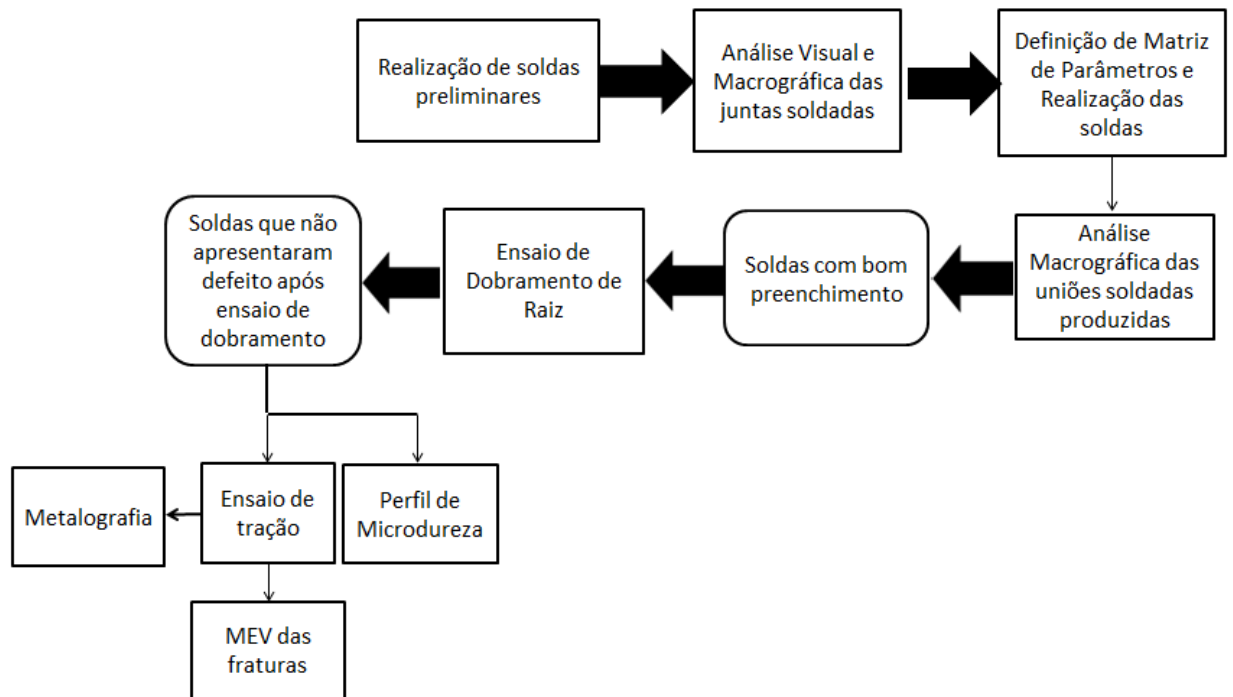
4.1 Descrição da metodologia

O fluxograma da Figura 10 demonstra de maneira esquemática a metodologia e ensaios utilizados para condução deste trabalho. O material utilizado nesse estudo foram chapas da liga de alumínio AA 5083-O de dimensões 400 mm x 80 mm x 6,35 mm.

O trabalho teve início com as soldas preliminares as quais foram baseadas em dados da literatura. Além da observação durante a soldagem, depois de executadas as soldas foi realizada uma análise qualitativa da junta, observando o aspecto visual da mesma, a formação de rebarbas e a presença de defeito superficial. As soldas que apresentaram um bom aspecto visual e sem excesso de rebarbas eram encaminhadas para inspeção de macrografia onde foi realizado o corte transversal da mesma e a preparação macrográfica a fim de verificar se a mistura interna era adequada entre os materiais, a presença de algum vazio ou outro tipo de defeito que pudesse ser verificado nessa etapa.

A partir das soldas realizadas inicialmente foi definida uma janela de parâmetros a qual possivelmente seriam obtidas soldas com bom preenchimento. Para melhor planejamento e otimização dos parâmetros foi utilizada uma matriz de experimentos Box-Behnken. Após a definição da matriz de parâmetros que foi utilizada as soldas foram realizadas conforme a mesma, as juntas soldadas que apresentaram bom aspecto superficial foram encaminhadas a análise macrográfica. A partir da macrografia verificaram-se as uniões que possuíam bom preenchimento, ou seja, sem a presença de vazios internos e então essas foram selecionadas para o ensaio de dobramento de raiz, o ensaio de dobramento foi realizado até o ângulo de aproximadamente 150° e foi utilizado como critério para indicar em quais juntas soldadas seriam realizados o ensaio de tração, perfil de microdureza e metalografia.

Figura 10 - Fluxograma representando a metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: O Autor

4.2 Equipamento utilizado

Para o desenvolvimento dos estudos de soldagem foi utilizada a máquina dedicada para soldagem do processo FSW. Esse equipamento pertence ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e tem capacidade de 70 kN de força e rotação máxima de 4000 rpm (Figura 11). O monitoramento dos dados de comando e respostas é realizado simultaneamente durante a execução da soldagem.

Figura 11 - Máquina de soldagem FSW utilizada para realização das soldas.



Fonte: O Autor

4.3 Material

Os materiais utilizados como metal de base foram chapas de alumínio AA 5083-O que passaram pelo processo de corte a laser a fim de obter as seguintes dimensões: 400 mm x 80 mm x 6,35 mm, sendo suas propriedades mecânicas conforme o tratamento térmico de recozimento.

A ferramenta não consumível utilizada para a execução das soldas era composta do aço ferramenta AISI H13 pode-se observar a composição química

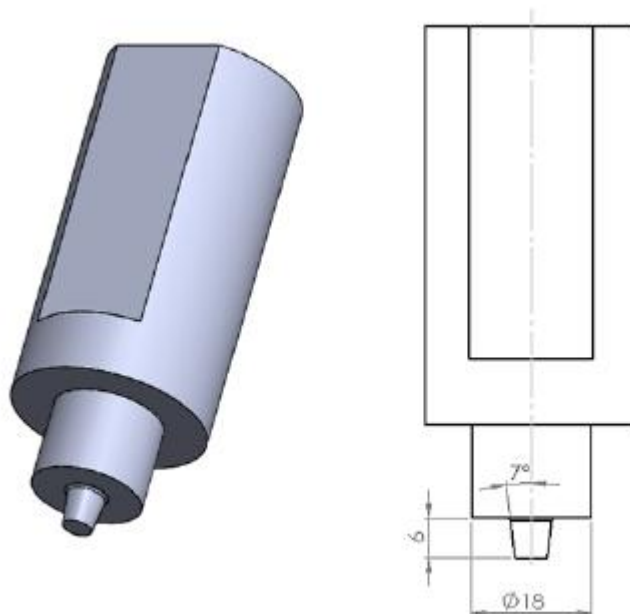
típica na Tabela 7. A ferramenta passou pelo processo de usinagem, para obtenção da geometria mostrada na Figura 12, e após isso foi aplicado o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Tabela 7 - Composição química da ferramenta utilizada.

Ferramenta	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
AISI H13	0,40	1,00	0,35	5,20	1,5	0,90

Fonte: (WALTER et al., 2017)

Figura 12 - Geometria da ferramenta utilizada para a realização das soldas.



Fonte: (WALTER et al., 2017)

4.4 Parâmetros de Soldagem

Para definição dos parâmetros de soldagem foram realizadas soldas preliminares com parâmetros obtidos em literatura (ALMEIDA, 2013). A realização dessas uniões possibilitou conhecer o comportamento do equipamento de soldagem, sistema de fixação das chapas juntamente com a visualização prévia das juntas produzidas .

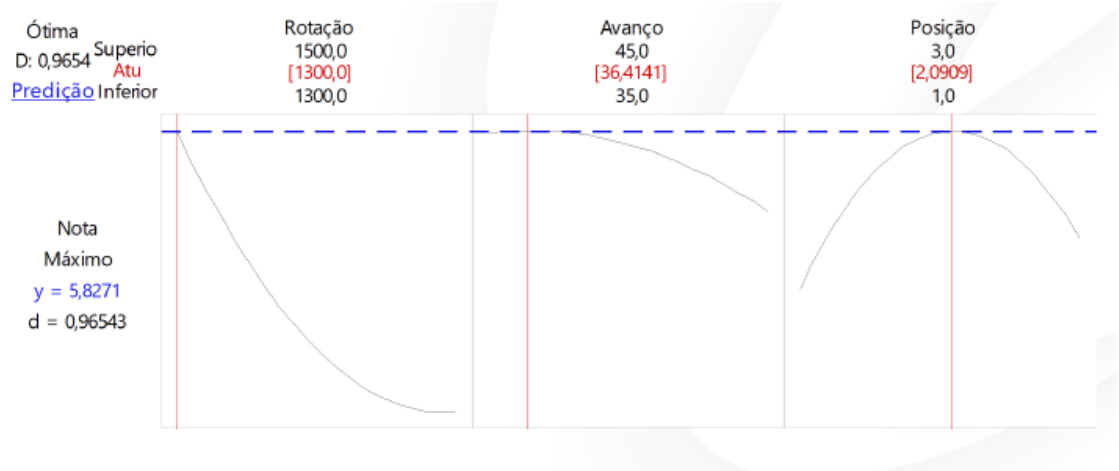
Com o conhecimento dos parâmetros possíveis para serem utilizados na produção de juntas soldadas aplicou-se o planejamento de experimentos Box-Behnken. Foram utilizados três variáveis a três níveis, no qual os parâmetros

foram: rotação (rpm), velocidade de avanço (mm/min) e penetração do ombro da ferramenta (posição de soldagem em milímetros).

Foi realizada uma matriz de experimentos com os seguintes valores, para rotação (rpm): 1500, 1400 e 1300, velocidade de avanço (mm/min): 45, 40 e 35 e posições de soldagem: denominadas “1” com a maior penetração da ferramenta de 0,2 mm, a posição “2” com 0,15 mm de penetração e a posição “3”, com 0,1 mm de penetração.

Definida a matriz, foram realizadas as soldas e analisadas através de inspeção visual e macrografia. Após a análise das soldas e com o auxílio do software Minitab®, as juntas soldadas foram classificadas, através da atribuição de notas, e então a partir do estudo desses resultados foi possível obter uma tendência dos melhores parâmetros. Os valores apontados pelo software podem ser observados na Figura 13 (SCHROEDER et al., 2018).

Figura 13 - Curvas de otimização da variável de resposta “Nota”.



Fonte: (SCHROEDER et al., 2018)

Os valores destacados entre colchetes (em vermelho) na Figura 13 foram definidos como os melhores pelo software, portanto, a rotação de 1300 rpm, velocidade de avanço de aproximadamente 35 e posição de soldagem 2. Através dos resultados obtidos da primeira matriz e após análise e a tendência demonstrada pelo software Minitab foi definida uma nova matriz de parâmetros. A nova matriz apresentou valores de rotação e velocidade de avanço mais baixos, portanto para rotação (rpm) foram utilizados os valores: 1300, 1200 e 1100, para velocidade de avanço (mm/min): 35, 30 e 25, as posições de

soldagem foram mantidas as mesmas devido a limitações relacionadas a essa variável com o sistema de soldagem utilizado (Tabela 8). Os experimentos e valores utilizados podem ser observados detalhadamente na Tabela 9. Todas as soldas foram realizadas com o mesmo valor de ângulo de inclinação da ferramenta de 2,5° e pré-aquecimento de 30 segundos.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados e seus respectivos níveis.

Parâmetros	-1	0	1
Rotação [rpm]	1100	1200	1300
Velocidade de avanço [mm/min]	25	30	35
Profundidade de penetração [mm]	0,10 (Posição 3)	0,15 (Posição 2)	0,20 (Posição 1)

Fonte: O Autor

Tabela 9 - Condições de ensaios e variações de parâmetros utilizados.

Experimento Nº solda	Rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Posição da ferramenta
1	1200	30	2
2	1100	30	3
3	1200	30	2
4	1300	25	2
5	1100	35	2
6	1300	30	1
7	1300	35	2
8	1200	35	3
9	1200	30	2
10	1200	35	1
11	1200	25	1
12	1300	30	3
13	1100	30	1
14	1100	25	2
15	1200	25	3

4.5 Análise Macrográfica e Microestrutural

A análise macrográfica foi realizada em todas as juntas soldadas que apresentaram uma superfície homogênea e bom preenchimento superficial a fim de obter uma visão geral, verificação de defeitos e fluxo de material da solda. A partir das macrografias foram selecionadas as soldas que não obtinham vazios para análises posteriores.

As análises macrográficas e metalográficas foram realizadas através do corte transversal das soldas e preparadas segundo os procedimentos metalográficos padrões de embutimento, lixamento e polimento. O corte foi realizado na máquina por disco abrasivo. Após isso as amostras foram embutidas a frio e submetidas aos procedimentos convencionais de lixamento e polimento manual com pastas de diamante de 4 μm e 1 μm respectivamente.

Após a preparação metalográfica foi realizado o ataque químico com o reagente Keller (2,5 ml HNO_3 + 1,5 ml HCl + 1 ml HF e 95 ml de água) através da imersão por aproximadamente 20 segundos. A análise por microscopia óptica foi utilizada a fim de analisar a interface da junta, defeitos de soldagem, identificação e avaliação das zonas de solda. Essas análises foram realizadas no microscópio óptico da marca Leica, modelo DM 2200, com micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

4.6 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento foi realizado para se obter uma análise qualitativa da ductilidade das soldas, as amostras passaram por ensaio de dobramento de raiz, duas amostras de cada conjunto de parâmetros foram preparadas para este ensaio. As amostras ensaiadas foram as soldas de número 6, 10, 11, 12, 13 e 15 (Tabela 9), pois as mesmas apresentaram bom preenchimento interno, um exemplo de corpo de prova utilizado pode ser visualizado na Figura 14. Esse ensaio também foi utilizado como critério para avaliação de quais juntas soldadas passariam pelo ensaio de tração e microdureza, sendo assim, as amostras que não apresentaram defeito após o dobramento passaram para essas análises posteriores.

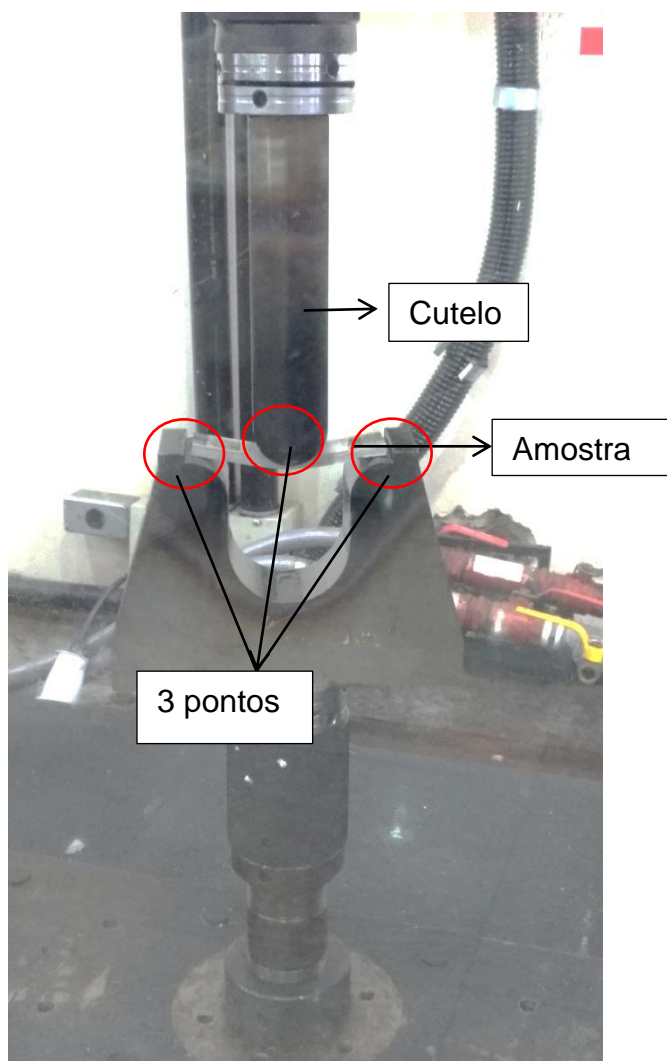
O ensaio foi baseado na norma ISO 5173 “*Destructive tests on welds in metallic materials - Bend test*”, realizado na máquina de ensaios Universal da marca INSTRON, eletromecânica, modelo 5585H, com capacidade de 250 kN em tração e compressão. Uma imagem do dispositivo utilizado no ensaio pode ser observada na Figura 15.

Figura 14 - Geometria dos corpos de prova para o Ensaio de Dobramento.



Fonte: O Autor

Figura 15 - Imagem do Ensaio de Dobramento em andamento.



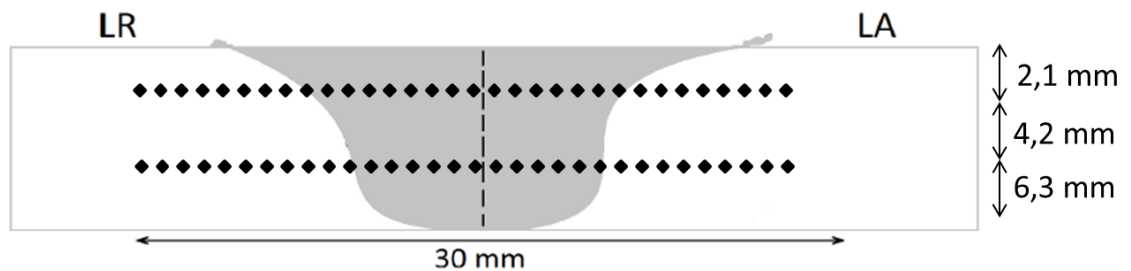
Fonte: O Autor

4.7 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras que foram bem sucedidas no ensaio de dobramento, portanto nas soldas identificadas como 6, 10, 11 e 13, de acordo com a Tabela 9. As análises dos perfis de microdureza foram realizadas nas seções transversais às soldas, em duas localizações a 2,1 mm e a 4,2 mm com relação à superfície da amostra, conforme esquema da Figura 16. Essas posições foram selecionadas para poder comparar a zona mais próxima da superfície de solda da zona onde se formam os chamados *onion rings* (4,2 mm).

As medições foram realizadas em amostras previamente polidas, as indentações foram realizadas com uma carga de 0,5 kgf, por um tempo de 10 segundos e distância de 0,6 mm entre as mesmas. O equipamento no qual foram realizadas as análises é o microdurômetro INSTRON Tukon 2100-B. Através desse ensaio é possível analisar a resistência da união soldada bem como correlacionar com a microestrutura obtida pelo processo.

Figura 16 - Esquema do perfil de dureza realizado ao longo de duas posições da espessura das amostras em secção transversal as soldas: a 2,1 mm e 4,2 mm da superfície de soldagem.



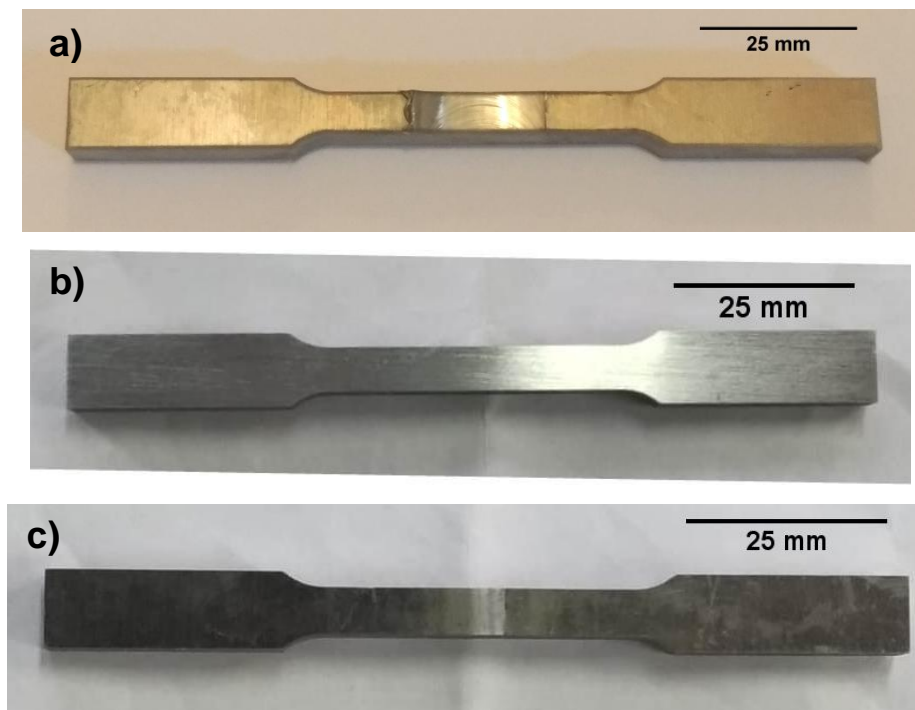
Fonte: O Autor

4.8 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado nas juntas soldadas que não apresentaram defeito no ensaio de dobramento, as soldas de números 6, 10, 11 e 13. Foram usinados três corpos de prova (cps) de cada conjunto de parâmetros utilizados. O equipamento utilizado foi a máquina de ensaios universal da marca INSTRON, eletromecânica, modelo 5585H, com capacidade de 250 kN em tração e compressão. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma ASTM E8: “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”, na direção transversal à solda para determinação do limite de resistência à tração, escoamento e o alongamento das uniões soldadas, os cps estão representados na Figura 17. Além disso, também foi realizado o ensaio de tração em três amostras das chapas do material de base a fim de obter um valor comparativo às chapas soldadas.

Após o ensaio de tração foi selecionado um corpo de prova de cada combinação de parâmetros para serem analisadas as suas respectivas superfícies de fratura em lupa de baixo aumento e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Shimadzu, modelo SSX-550. Essa análise foi realizada para entender o fenômeno que pode ter ocorrido na fratura dos corpos de prova durante o ensaio, visto que todos romperam no lado de avanço da junta soldada. Além disso, foi realizada a macrografia dos corpos de prova rompidos para identificar o local de ruptura na junta soldada.

Figura 17 – Corpos de prova usinados para o ensaio de tração em a) após usinagem, antes de ser lixado, b) após preparação para o ensaio parte superior da solda, c) parte inferior da solda.



Fonte: O Autor

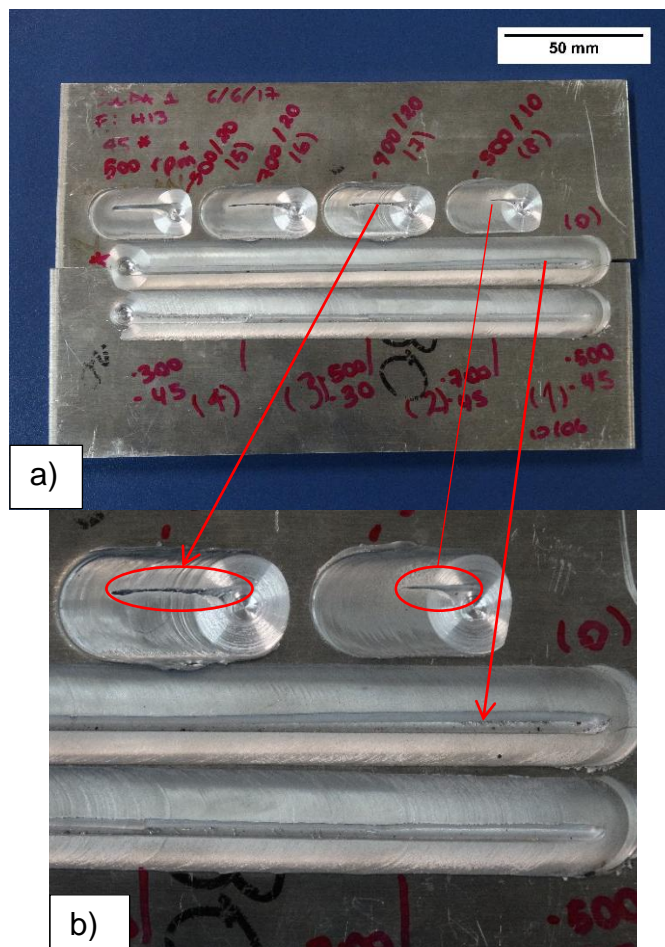
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Definição dos Parâmetros de Soldagem

Partindo-se dos parâmetros pesquisados na literatura (ALMEIDA, 2013) as primeiras juntas produzidas apresentaram falta de preenchimento superficial. Esse defeito, segundo a literatura pesquisada, é ocasionado por causa da falta de energia na união e/ou mistura de material mal conduzida durante o processo (BESKOW, 2013), (KIM et al., 2006).

Outros parâmetros foram aplicados com o objetivo de fornecer mais energia ao processo eliminando o defeito gerado, portanto a rotação foi aumentada e a velocidade de avanço diminuída. Dentre as diversas soldas realizadas nesta etapa de ajuste de parâmetros algumas podem ser observadas na Figura 188 (a) bem como o defeito de falta de preenchimento superficial Figura 18 (b).

Figura 18 - Soldas realizadas durante os testes de parâmetros a) Juntas soldadas testes. b) Detalhe do defeito gerado.



Fonte: O Autor

O primeiro conjunto de parâmetros foi composto por rotação de 500 rpm e a velocidade de avanço 45 mm/min, a solda com esses parâmetros está apresentada no centro da Figura 18. Notou-se que com a diminuição da velocidade de avanço e o aumento da rotação a falta de preenchimento superficial se tornava menor, porém valores muito altos de rotação acabavam gerando rebarbas excessivas e superfície muito rugosa. Assim, após alguns testes, foi possível obter uma janela de parâmetros da qual foi elaborado um planejamento de experimentos Box-Behnken conforme descrito no item 4.4. Visto isso, a janela de parâmetros definida obtinha valores de velocidade de avanço menores que o inicial e de rotação maiores.

Apesar de neste trabalho terem sido selecionados três parâmetros para serem variados e otimizados, para avaliação de uma junta soldada por esse processo, a seleção dos parâmetros ideais depende de vários fatores, além do

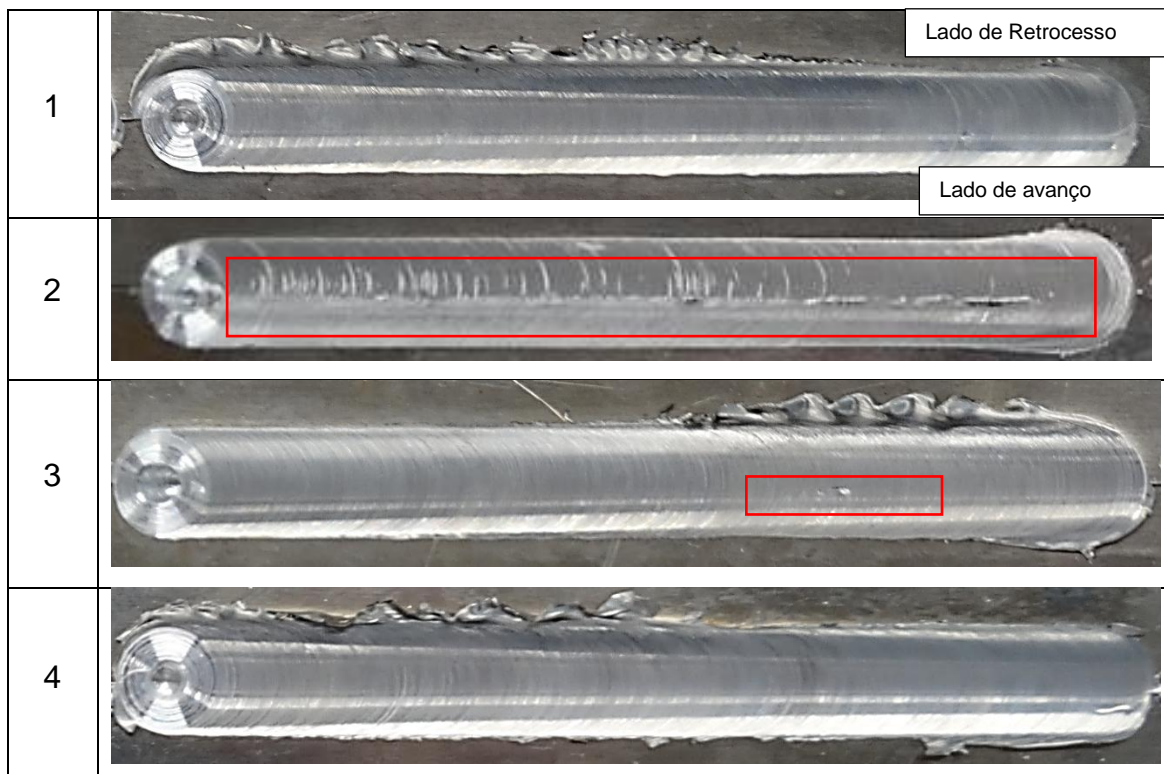
material base e espessura da chapa, os parâmetros adequados são influenciados pelo material e geometria da ferramenta, pelo material que se situa abaixo do processo de soldagem (*backing bar*), pelas condições de fixação das chapas a serem unidas, pelas características do equipamento utilizado para soldagem, aporte térmico, temperatura do sistema, entre outros (TRUMMER et al., 2012) (KULKARNI et al., 2018).







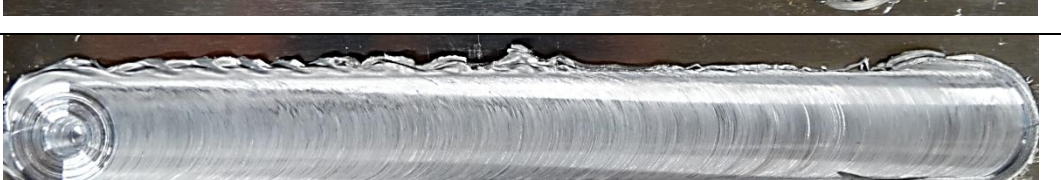
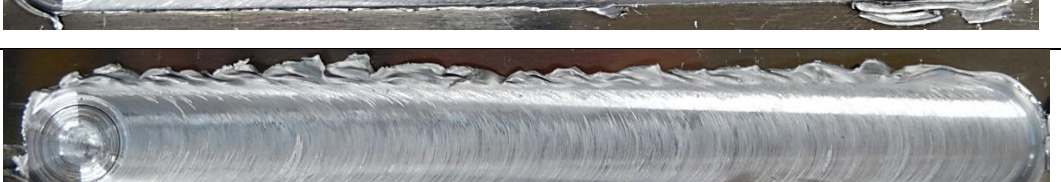


5.2 Análise Macroestrutural

5.2.1 Inspeção Visual

Logo após a soldagem das chapas de AA5083-O, de acordo com a matriz de parâmetros definida, foi realizada uma análise visual de cada junta soldada produzida da matriz. A Tabela 10 mostra o aspecto visual da vista de topo das soldas que estão dispostas de acordo com a numeração da matriz de parâmetros apresentada na Tabela 9.

Tabela 10 - Fotos das juntas soldadas produzidas de acordo com a matriz de parâmetros, apresentada na Tabela 9, definida para condução deste trabalho.



5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	



Fonte: O Autor

A partir das imagens das juntas soldadas podem-se verificar algumas constatações, como, pode ser observado que a solda 2 obteve falta de preenchimento superficial por praticamente toda extensão da união soldada, isso pode estar associado com a combinação de parâmetros de menor rotação (1100 rpm) e menor penetração da ferramenta (posição 3) o que acaba gerando insuficiente mistura e aporte térmico a solda.

Outro fator a ser destacado é que o excesso de rebarbas tem uma maior tendência de se formar no lado de retrocesso da solda, isso pode ocorrer devido ao ângulo de $2,5^\circ$ utilizado nas soldas que segundo (Keivani et al. 2013) acaba gerando insuficiente material plastificado entre o ombro da ferramenta e a zona de mistura, assim formando rebarba do lado de retrocesso da ferramenta.

Existem diferentes fatores que podem levar a formação excessiva de rebarbas, a maioria está relacionada ao excesso de calor durante o processo, no caso das juntas soldadas realizadas neste trabalho foi verificado maior rebarba do lado de retrocesso das soldas. Este fato está associado a uma heterogeneidade no calor gerado entre o ombro da ferramenta e as peças que estão sendo unidas e assim ocorre um superaquecimento da superfície, assim o material muito plástico na superfície acaba sendo expulso em forma de rebarba (KIM et al., 2006). Ainda, pode-se evidenciar que a maior parte das uniões soldadas que apresentaram maior quantidade de rebarba estão associadas aos maiores valores de rotação utilizados que são 1200 e 1300 rpm, fato o qual já é verificado por outros autores (KAH et al., 2015).

As soldas 1, 3 e 9 representam os parâmetros intermediários utilizados sendo eles, rotação 1200, velocidade de avanço 30 mm/min e posição 2, porém todas apresentaram algum tipo de defeito. Os defeitos encontrados foram: a falta de preenchimento superficial, defeito na saída da ferramenta e consequentemente o vazio interno, uma vez que todas as soldas realizadas

com a posição de soldagem 2 foram insatisfatórias, se afirma que essa posição não era adequada para as condições de soldagem conduzidas.

Algumas dispersões de resultados podem ocorrer devido a fatores externos que não foram monitorados na execução deste trabalho. A qualidade das juntas soldadas pelo processo FSW, não depende apenas dos parâmetros avaliados (rotação, velocidade de avanço e penetração da ferramenta) neste trabalho, pode ser influenciada, por exemplo, pela temperatura inicial do equipamento e ambiente, a força axial desenvolvida durante o processo, a pressão de aperto do sistema de fixação das chapas de material base, a extração de calor do sistema (VIJAYAN; RAJU; RAO, 2010).

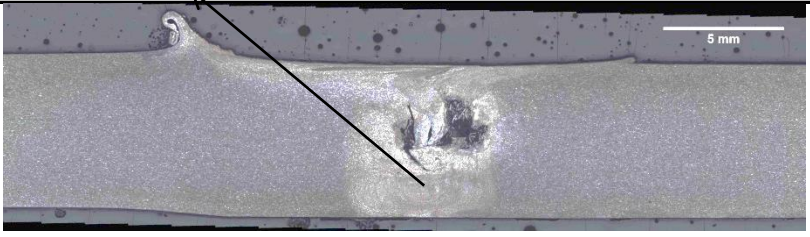
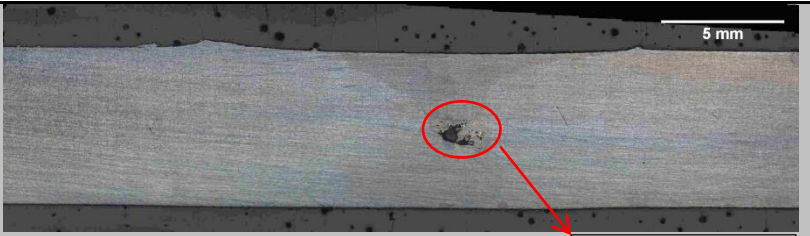

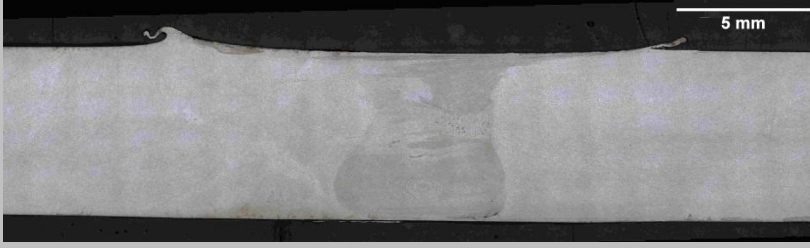
Trummer et al (TRUMMER et al, 2012) concluiu que a fixação influencia diretamente nas propriedades das uniões soldadas. O material do *backing bar* também modifica as propriedades das juntas obtidas, por exemplo, quando feitas de cobre ocorre uma rápida extração de calor do material a ser soldado o que pode ocasionar a geração de defeitos da solda. Quando utilizados materiais cerâmicos foi verificado que estes produzem uma distribuição uniforme da temperatura ao longo da união soldada (KULKARNI; PANKADE, 2018).




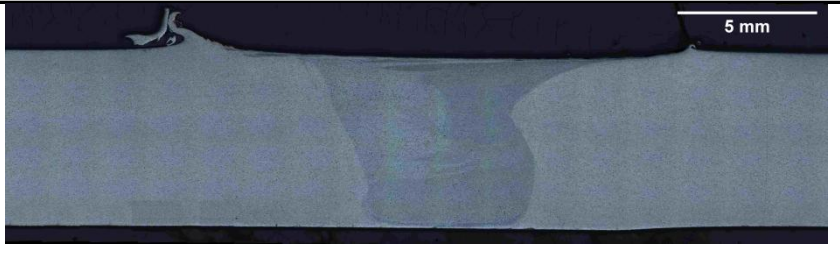
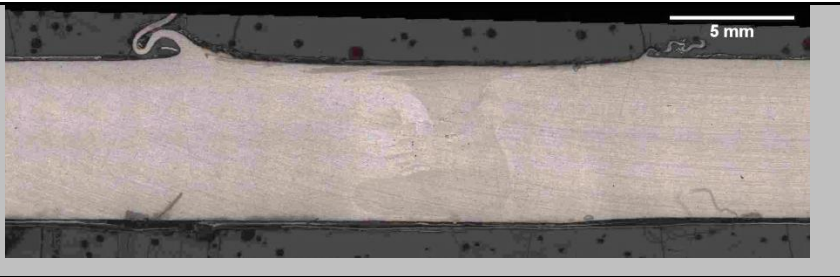
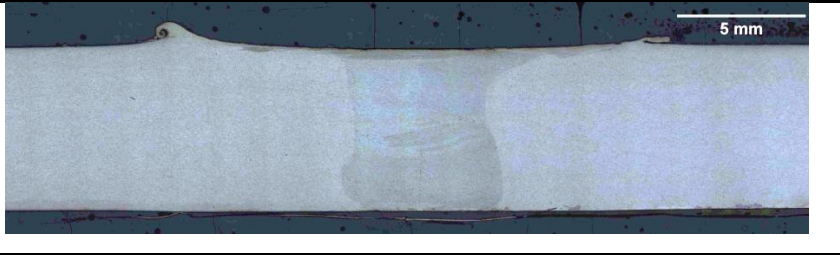
Ainda foram realizadas as macrografias das uniões soldadas para melhor análise sobre geração de defeitos, fluxo de material e regiões de solda.

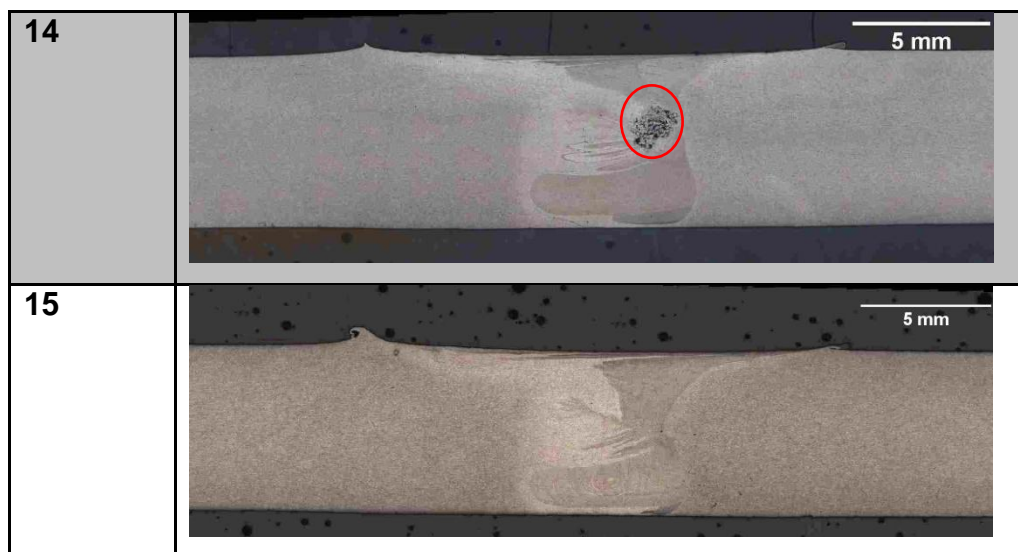
5.2.2 Macrografias

As análises macrográficas foram realizadas em todas as soldas que apresentavam um bom acabamento superficial com ausência de vazios ou algum outro defeito que poderia ser identificado na análise visual. As imagens de macrografias obtidas em microscópio óptico apresentadas na Tabela 11 mostram a seção transversal das uniões soldadas. Na Tabela 11 estão indicados o Lado de Avanço (LA), o Lado de Retrocesso (LR) de soldagem em relação a ferramenta e a zona central chamada na bibliografia de Zona de Mistura (ZM) na qual se identificam os *onion rings*.

Tabela 11 - Macrografias das uniões soldadas obtidas sendo cada número de solda correspondente aos parâmetros da Tabela 9.

Nº Solda	Macrografias			
	<i>Onion rings</i>	LR	ZM	LA
1				
2	Não foi realizada a macrografia devido à presença do defeito superficial.			
3	Não foi realizada a macrografia devido à presença do defeito superficial.			
4	 <p>Vazio na ZM do LA</p>			
5	 <p>Vazio interno: defeito gerado provavelmente pela mistura inadequada de material durante o processo.</p>			
6				

7	
8	
9	<p>Não foi realizada a macrografia devido à presença do defeito superficial.</p>
10	
11	
12	
13	



Nas macrografias pode ser observada a severa deformação do material promovido pelo processo. Pode ser destacado na zona de mistura as regiões características como os *onion rings* na zona de mistura raiz da solda.

A partir das macrografias foi verificado que algumas soldas sem o defeito superficial, continham vazios internos. O defeito, de forma geral, aparece no lado de avanço das juntas soldadas, esse tipo de defeito pode ser gerado por duas causas principais: energia insuficiente e/ou mistura inadequada do material no processo. Kim et al (2006) afirma que há diferenças entre os defeitos gerados por cada uma dessas causas.

O defeito apresentado nas juntas soldadas reproduzidas nesse trabalho por suas características, segundo (KIM et al., 2006) é denominado mistura inadequada (*abnormal stirring*) e normalmente é gerado devido à diferença de temperatura entre a parte superior da peça que está sendo soldada com a inferior, esse tipo de defeito tende a aumentar com o aumento da velocidade de avanço devido a inadequada mistura de material (CRAWFORD et al., 2013). Outra razão pela qual o defeito tende a se formar no lado de avanço é devido a mudança microestrutural mais brusca que ocorre entre o mesmo e a zona de mistura refinada enquanto que no lado de retrocesso essa mudança é mais gradual (LEAL; LOUREIRO, 2004).

O local onde ocorre esse defeito identificado nas macrografias é chamado por (CHEN; PASANG; QI, 2008) de junção tripla das zonas de fluxo do ombro, zona de mistura e zona termomecanicamente afetada externa. Esse

vazio está associado ao insuficiente fluxo gerado pelo ombro, com um fluxo mais homogêneo da ferramenta esse vazio seria preenchido.

Enfim, as soldas de número 6, 10, 11, 12, 13 e 15 a partir das macrografias demonstraram obter um bom preenchimento interno e uma mistura adequada dos materiais, por isso foram selecionadas para o ensaio de dobramento.

5.3 Avaliação Mecânica

5.3.1 Ensaio de Dobramento








O ensaio de dobramento foi realizado para verificar a ductilidade da região da solda e verificar se houve penetração total das juntas, foram realizados ensaios de dobramento de raiz nas amostras que não apresentaram vazios nas macrografias que foram as soldas número 6, 10, 11, 12, 13 e 15.

De acordo com a norma ISO 25239-5: “*Friction Stir Welding – Aluminium-Part 5: Quality and inspection requirements*” as amostras devem ser dobradas até o ângulo de 150°. As juntas soldadas que não apresentaram defeito após o ensaio foram as de número 6, 10, 11 e 13 e então essas foram encaminhadas para os ensaios de tração e microdureza.

A Figura 190 mostra as juntas soldadas após serem submetidas ao ensaio de dobramento, observa-se que o defeito que surgiu nas soldas 12 e 15 apareceu do lado de avanço de soldagem bem como o local do vazio observado nas macrografias.

Figura 19 - Imagens das amostras: 6, 10, 11, 12, 13 e 15 após ensaio de dobramento

Nº solda	Amostras após dobramento	Defeito em detalhe
6		Sem defeito

10		Sem defeito
11		Sem defeito
12		
13		Sem defeito
15		

Verificando os parâmetros das uniões soldadas que foram aprovadas no ensaio de dobramento (6, 10, 11 e 13) percebe-se que apesar de possuírem diferentes valores de rotação e velocidade de avanço (Tabela 9), todas foram realizadas na posição 1 de soldagem, ou seja, com a maior penetração da

ferramenta, portanto, se afirma que dentre as posições de soldagem utilizadas essa obteve a melhor penetração e desempenho no ensaio de dobramento.

5.3.2 Ensaio de Microdureza

A microdureza avalia indiretamente a resistência do material nas diferentes zonas das juntas soldadas o que se pode associar com as diferentes microestruturas formadas pelas modificações geradas do processo FSW.

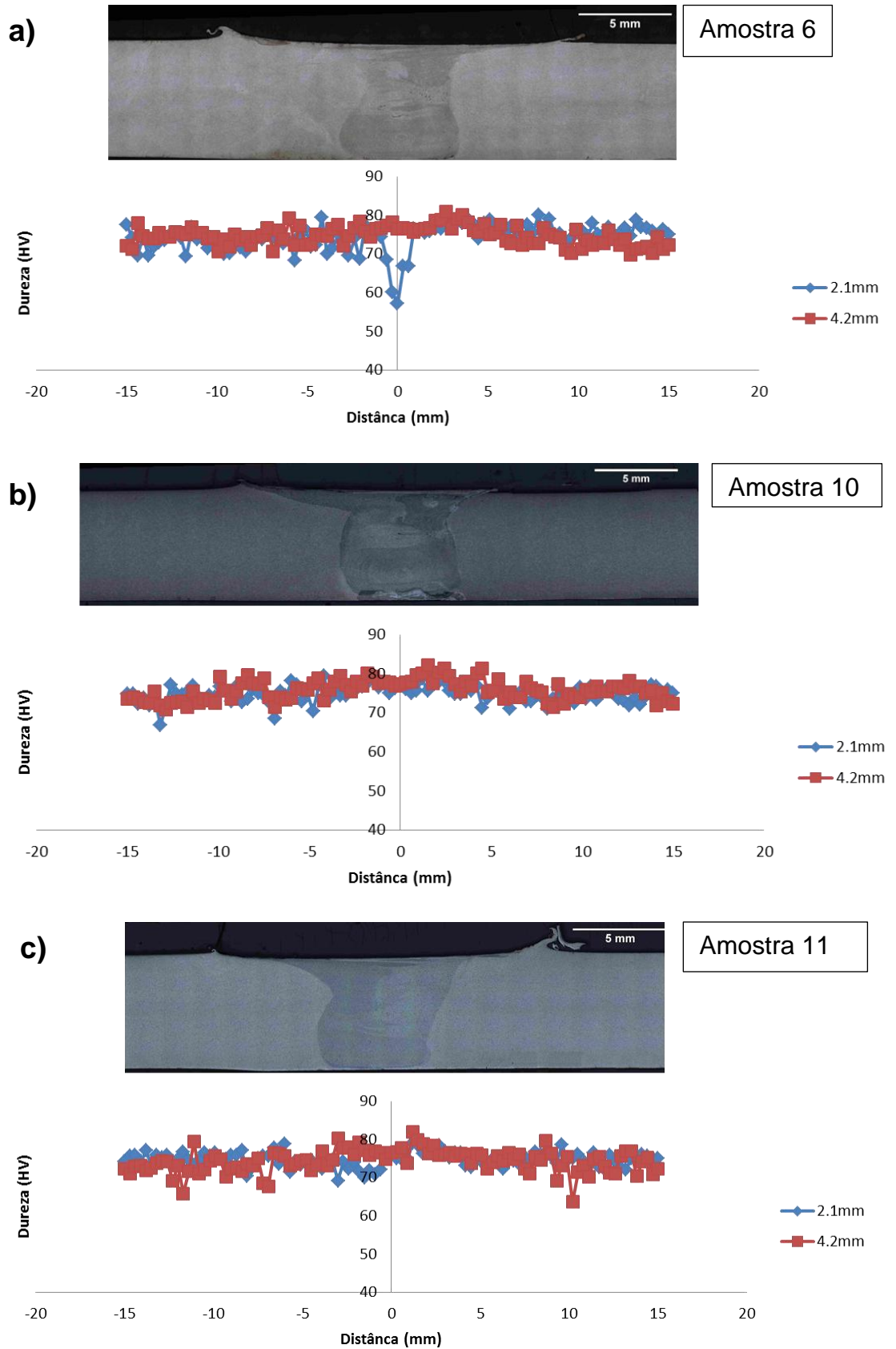
A dureza das juntas soldadas de alumínio pelo processo FSW são influenciadas por vários fatores, como, composição química, trabalho mecânico realizado na liga, temperatura do processo, porém nesse caso o material soldado é o AA5083-O, ou seja, está no estado recozido. Os perfis de microdureza realizados podem ser observados na Figura 20.

Os perfis de microdureza analisados demonstram não haver variação de dureza considerável entre o material base e as zonas de solda, todos os perfis se apresentaram bastante homogêneos e um range de dureza entre 65 e 85 HV, A amostra 6 apresentou uma queda de dureza em uma região o que está, provavelmente, associada a alguma porosidade.

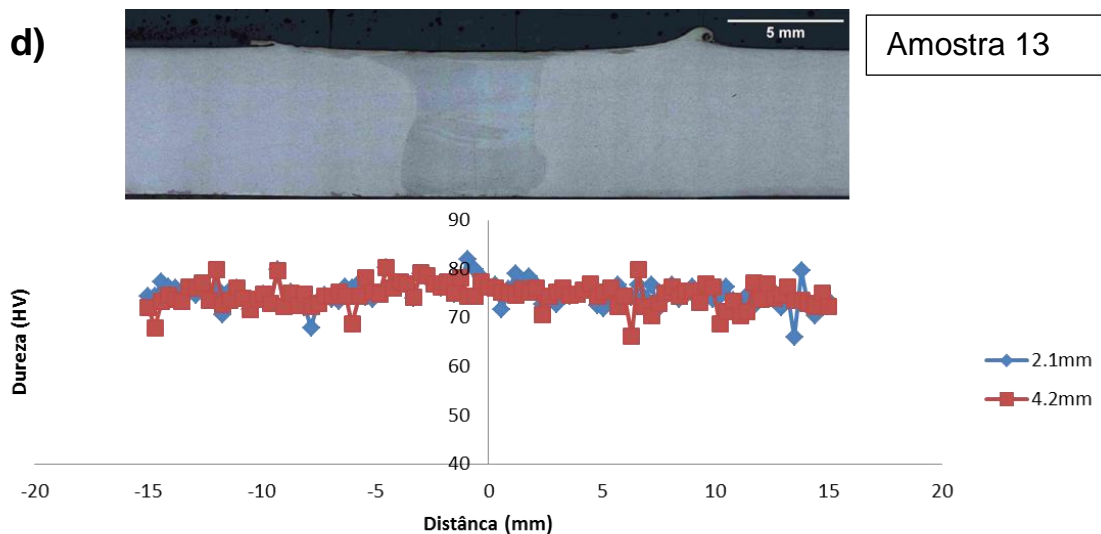
As medidas foram realizadas em duas posições pode-se verificar que a dureza mais próxima da superfície de soldagem, a 2,1 mm, apresenta valores muito semelhantes à região mais abaixo, a 4,2 mm da superfície, o que demonstra que as temperaturas e deformação do material causada pelo processo não afetaram os valores de dureza em relação ao metal base. Esse fato é um indício de que a microestrutura também não deve ter variado significativamente entre o material base e as regiões de solda.

Para ligas de alumínio não tratáveis termicamente, na condição de recozida já foi discutido em outras literaturas que o perfil de microdureza apresenta pouca ou nenhuma variação em relação ao material base, até pode-se considerar que não há uma zona afetada pelo calor. Em alguns casos a zona de mistura pode até apresentar maior dureza que o metal base devido ao trabalho a quente que pode ser realizado pelo processo ocasionando em um refino de grão (KUMBHAR; DEY, 2011).

Figura 20 - Perfis de dureza Vickers realizados nas amostras a) 6, b) 10, c) 11 e d) 13.



d)



Fonte: O Autor

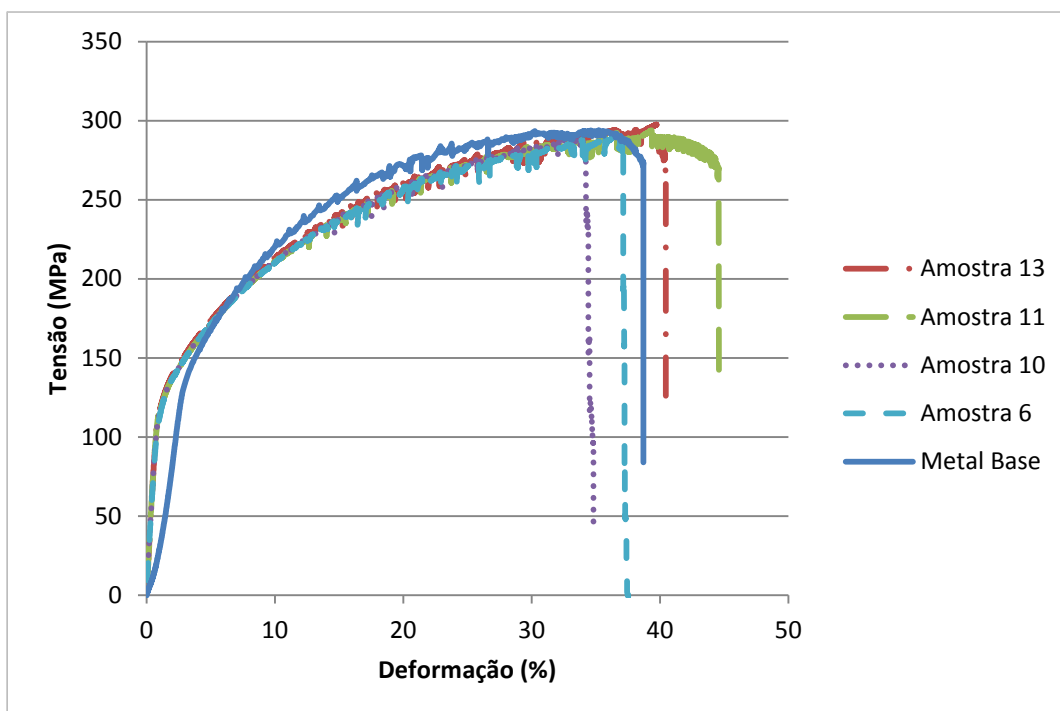
5.3.3 Ensaio de Tração

5.3.1 Resultados dos Ensaios de Tração

O ensaio de tração primeiramente foi realizado no material base assim obtendo-se resultados bem próximos aos encontrados na literatura para esse material em seu respectivo tratamento térmico. Como descrito anteriormente, as soldas que não apresentaram defeito no ensaio de dobramento passaram pelo ensaio de tração.

A partir deste ensaio foi possível obter os gráficos da Figura 21 que apresentam as curvas tensão-deformação obtidas a partir dos dados do ensaio de tração de um corpo de prova representativo de cada combinação de parâmetros ensaiados e para o material base. Ainda, nessas curvas resultantes é verificado o serrilhamento das mesmas, fato este que está associado ao efeito denominado envelhecimento dinâmico por deformação ou “*Portevin – Le Châtelier*” que ocorre tipicamente em ligas Al-Mg quando submetidas a deformação a temperatura ambiente (BAOHUI, 2002).

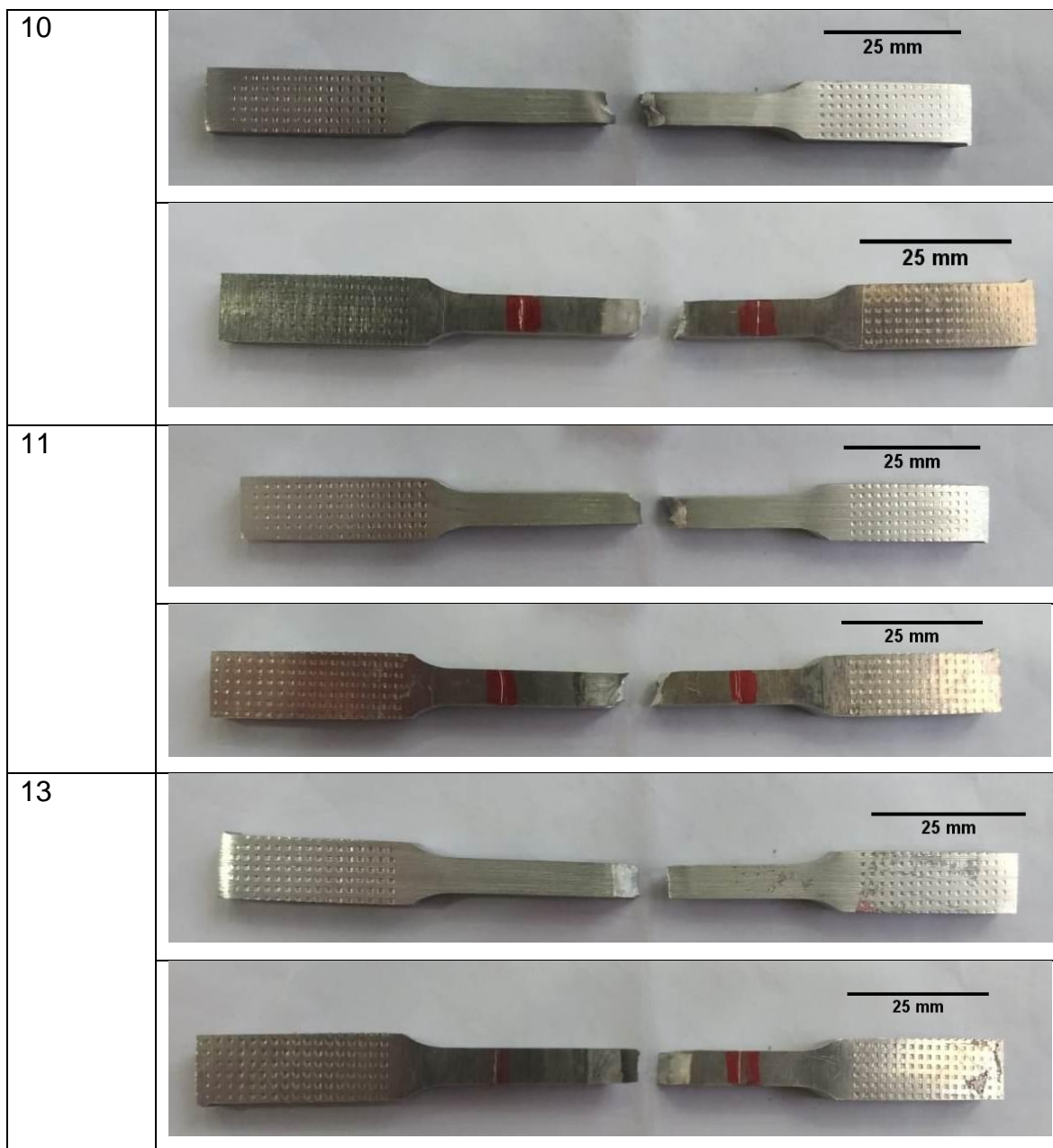
Figura 21 - Curvas tensão-deformação obtidas a partir de um corpo de prova representativo para cada combinação de parâmetros e também do metal base conforme cores e estilos indicados no gráfico.



Na Tabela 12 estão demonstradas as duas faces opostas dos corpos de prova das uniões soldadas 6, 10, 11 e 13 após o ensaio de tração tanto a parte superior quanto a inferior. As amostras demonstraram a deformação do material com a formação de pescoço e também que os cps das juntas soldadas romperam preferencialmente do lado de avanço da solda. A ruptura coincidiu com o mesmo local de falha do ensaio de dobramento.

Tabela 12 – Corpos de prova das juntas soldadas rompidos após o ensaio de tração.

Nº Solda	Lado de Retrocesso (LR)	Lado de Avanço (LA)
6		



Os valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento e seus respectivos desvios padrão, calculados a partir das curvas para as diferentes juntas soldadas e para o material base podem ser encontrados na Tabela 13 e também graficamente na Figura 23, sendo cada valor a média de amostras triplicatas.

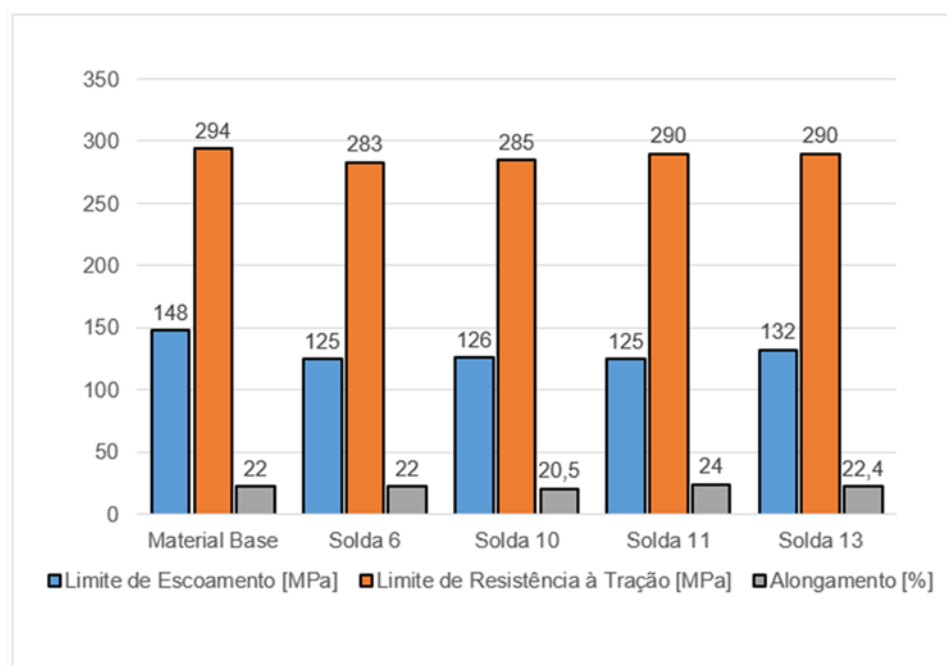
Os valores de limite de escoamento das juntas soldadas ficaram em média 85% quando comparados com valor referente ao metal base. A partir dos resultados obtidos se verifica que os limites de resistência ficaram bem próximos ao do metal base sendo que considerando o desvio padrão a solda 13 atinge o valor referente ao metal base.

O alongamento foi muito semelhante para todas as juntas soldadas e também em relação ao material base. Este resultado pode estar associado ao fato de, pela análise por microscopia óptica, não ter ocorrido mudanças significativas na microestrutura do material, bem como o seus perfis de microdureza terem se mantido constantes ao longo das regiões de solda em relação ao metal base.

Tabela 13 - Médias e desvios padrões dos valores de alongamento, limites de escoamento e resistência do material base e das soldas: 6, 10, 11 e 13.

	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Alongamento [%]	Local de Ruptura
Material Base	148 ± 1,5	294 ± 3	22*	X
Solda 6	125 ± 4	283 ± 9	22**	Lado de avanço da solda
Solda 10	126 ± 1	285 ± 6	20,5 ± 2	Lado de avanço da solda
Solda 11	125 ± 0,6	290 ± 3	24**	Lado de avanço da solda
Solda 13	132 ± 13	290 ± 8	22,4 ± 0,8	Lado de avanço da solda
*Valor retirado da literatura. Fonte: (TOTTEN et al., 2003)				
**Valores baseados em apenas um corpo de prova				

Figura 22 – Gráfico em colunas com os resultados do ensaio de tração: limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento do material base e juntas soldadas: 6, 10, 11 e 13.



5.3.2 Análise da superfície de fratura dos cps após o ensaio de tração

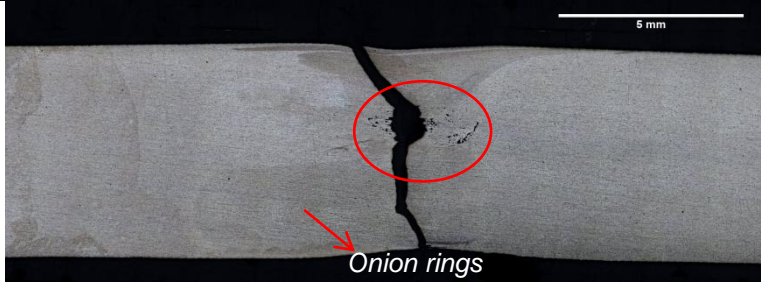


5.3.2.1 Macrografia do local de fratura dos corpos de prova do ensaio de tração

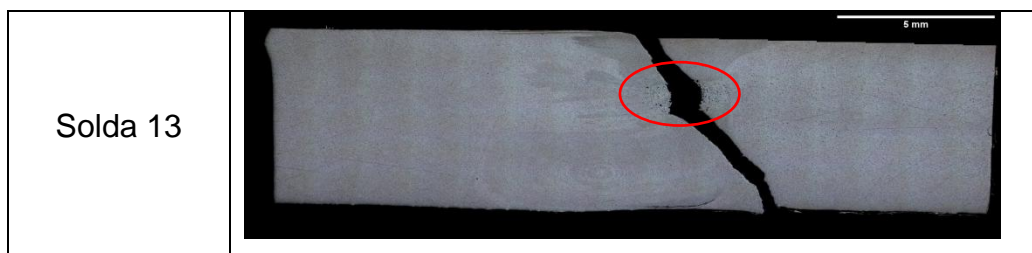
A Tabela 14 apresenta as imagens de macrografia mostrando o local de ruptura dos ensaios de tração nas juntas soldadas. Pode-se observar que todas as amostras, sendo elas as soldas número 6, 10, 11 e 13 romperam na zona de mistura do lado de avanço das soldas. A partir das macrografias é possível verificar a deformação do material, ou seja, a diminuição de seção transversal, que os cps sofreram durante o ensaio. Além disso, são fraturas muito semelhantes todas ocorrendo no mesmo local do lado de avanço com a zona de mistura central. A fratura neste local pode ter sido influenciada devido à falta de consolidação da solda presente neste local, visto que o vazio interno ocorreu em todas as outras juntas soldadas nesta posição.

Conforme o estudo de Peel et al. (2003) que monitorou o ensaio de tração das juntas soldadas por FSW com a técnica de Interferometria Eletrônica dos Padrões de Speckle (ESPI), primeiramente são formados alguns

vazios na região e depois há a propagação da trinca. Além disso, uma análise mais aprofundada da região em torno da trinca demonstrou ter partículas de óxidos e (AlSiFe) assim favorecendo a formação dos vazios e por conseguinte a fratura (Peel et al., 2003). Esses vazios, provavelmente, são formados devido à falta de uma sólida consolidação das juntas soldadas neste local, a plasticidade e taxas de difusão reduzidas do material resultando em uma interface mais frágil, ou também a presença das partículas de segunda fase que podem favorecer a fragilidade local. Além disso, do lado de avanço é onde ocorre o maior aporte térmico durante o processo (SILVA, 2017). Nas macrografias da Tabela 14 é possível observar esses vazios que estão evidenciados nas imagens, ainda uma análise mais aprofundada das superfícies de fratura foi realizada em MEV.

Tabela 14 - Macrografias das fraturas das juntas soldadas após o ensaio de tração.

Nº Solda	Lado de Retrocesso (LR)	Lado de Avanço (LA)
Solda 6		
Solda 10		
Solda 11		

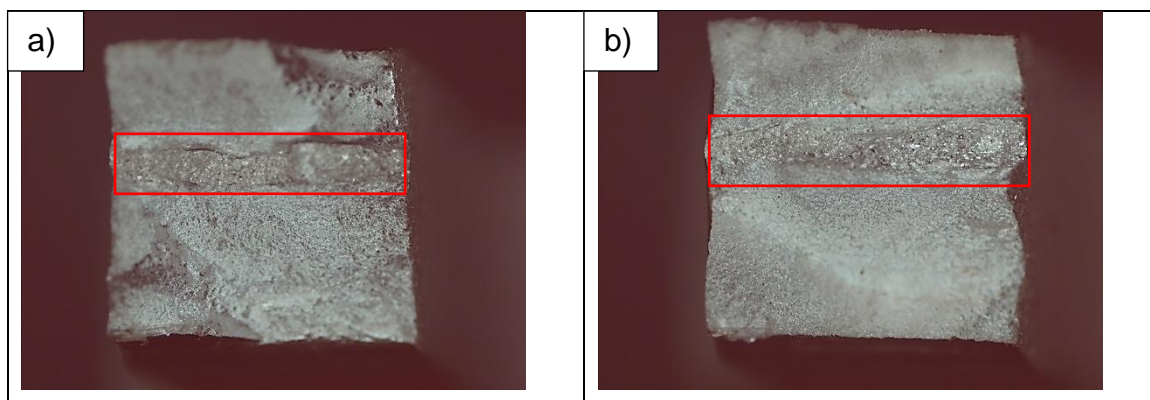


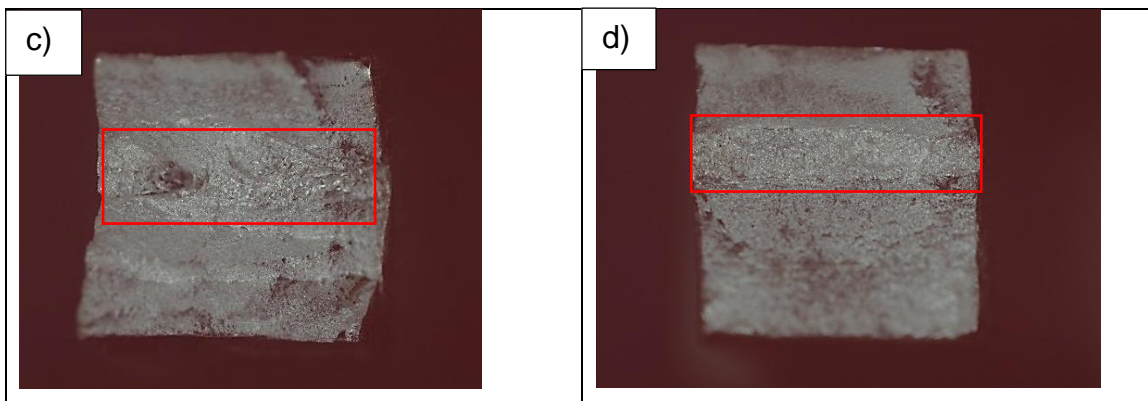
5.3.2.2 Análise em lupa de baixo aumento das fraturas do ensaio de tração

Foram realizadas análises em lupa de baixo aumento das fraturas do ensaio de tração que estão representadas na Tabela 15.

A partir das fractografias representadas na Tabela 15 se observa que as fraturas ocorreram de maneira semelhante. As regiões superiores e inferiores das fraturas demonstram ter aspecto mais fosco característico de fraturas dúcteis. Já a faixa central demonstra uma aparência diferente, com maior brilho e também demonstra ser o local onde provavelmente iniciou a fratura devido a presença de alguma inconsistência do processo de soldagem ou acúmulo de precipitados que favoreceu o início e propagação da fratura. Ainda foram realizadas imagens em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para maior esclarecimento dessas regiões de fratura.

Tabela 15- Imagens realizadas em lupa de baixo aumento das superfícies de fratura dos corpos de prova após o ensaio de tração das respectivas soldas a) 6, b) 10, c) 11 e d) 13.





5.3.2.3 MEV das fraturas do ensaio de tração

Após o ensaio de tração foi selecionado um corpo de prova de cada combinação de parâmetros para análise em MEV da superfície de fratura. Pode ser observado nas Figuras 24, 25, 26 e 27 que todas as fraturas demonstraram aparência e comportamentos semelhantes. Verificam-se diferentes regiões mas a fratura é predominantemente dúctil, sendo a parte superior e inferior compostas por *dimples* característica deste modo de fratura, confirmando o observado nas fractografias realizadas em lupa de baixo aumento.

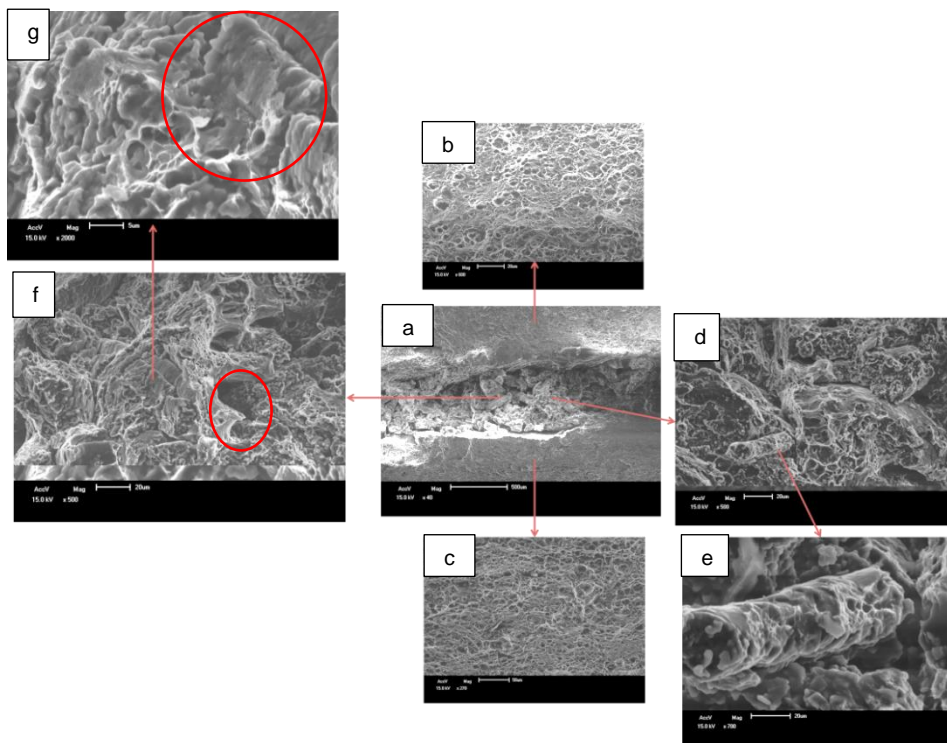
A parte central de cada fratura demonstra a deformação dos grãos causada pelo processo, além disso, se observa *dimples* mais alongados nessa região o que demonstra severa deformação plástica do material. Essa região apresenta a presença de alguns vazios que podem ser visualizados na imagem de menor aumento, esses vazios são formados pelo coalescimento dos precipitados (MENZEMER; SRIVATSAN, 1999), o crescimento desses vazios ocorre devido ao fenômeno chamado *void sheets* o que é ainda acelerado pela severa deformação plástica da matriz. Este é um importante fenômeno de falha que ocorre em materiais dúcteis nos quais os vazios são nucleados através das partículas de segunda fase a partir da decoesão entre as mesmas e a matriz ou pelo rompimento da mesma (BENZERGA, 2010).

Apesar de os precipitados da liga 5083 não exercerem essencial função na resistência mecânica, devido a sua intrínseca fragilidade tende a ocorrer trincas e fraturas através das mesmas, principalmente, quando o material é submetido a severas deformações, o que é o caso do processo FSW, assim

reduzindo a energia necessária para ruptura do material, ou mesmo pode ocorrer a segregação das partículas da matriz quando atingido um certo valor crítico de tensão local (MENZEMER; SRIVATSAN, 1999).

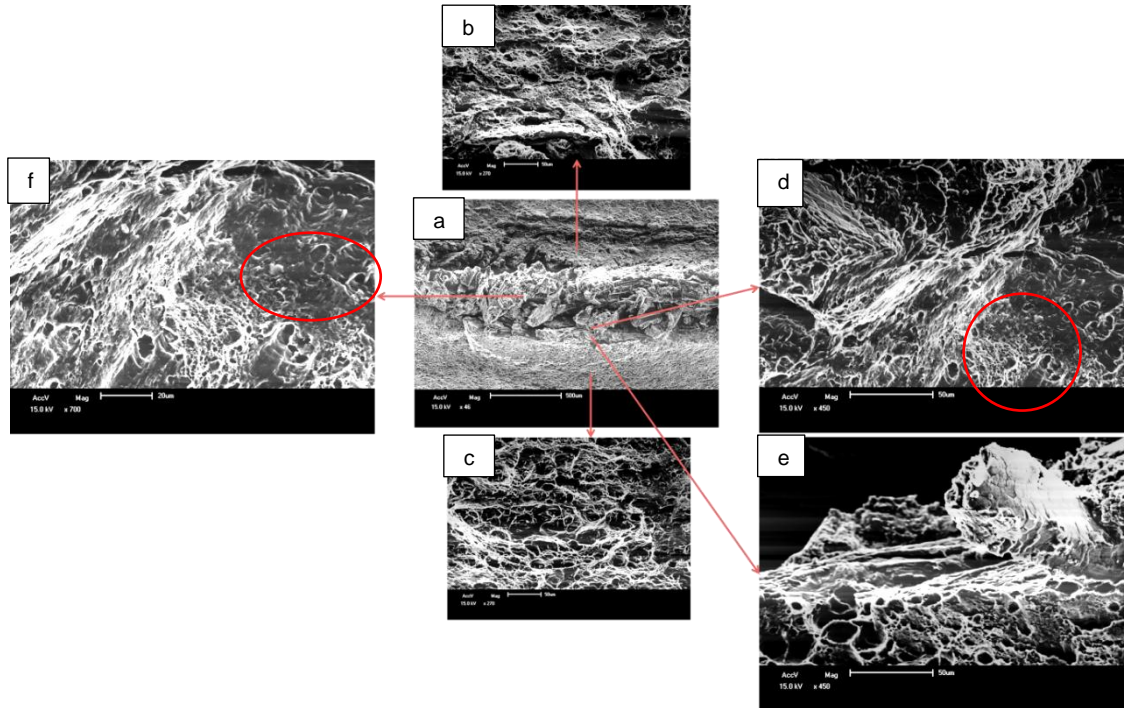
Outros trabalhos que estudaram os fenômenos de fratura da liga 5083 afirmam que dependendo do nível de deformação plástica exercida sobre o material vai variar o número de vazios e a taxa de crescimento dos mesmos (DARRAS et al., 2013), um trabalho mecânico mais severo irá diminuir o intervalo entre o surgimento dos microvazios e a fratura final.

Figura 23- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 6: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) deformação da zona central da fratura com microcavidades, g) severa deformação plástica do material na zona central de fratura em maior detalhe.



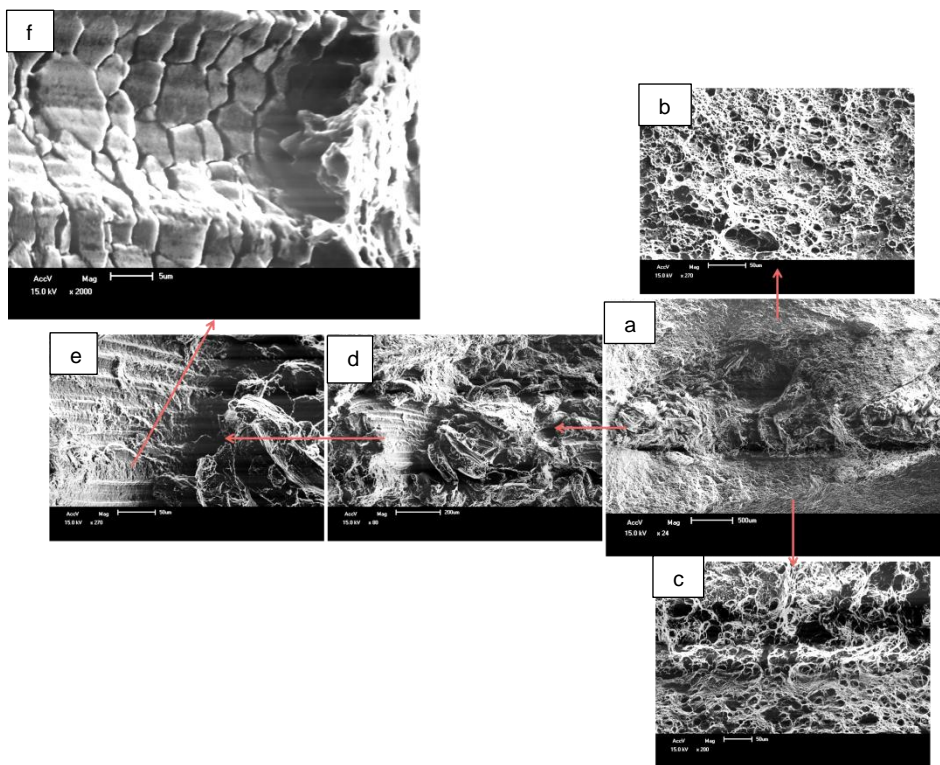
Fonte: O Autor

Figura 24- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 10: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) deformação da zona central da fratura com microcavidades,



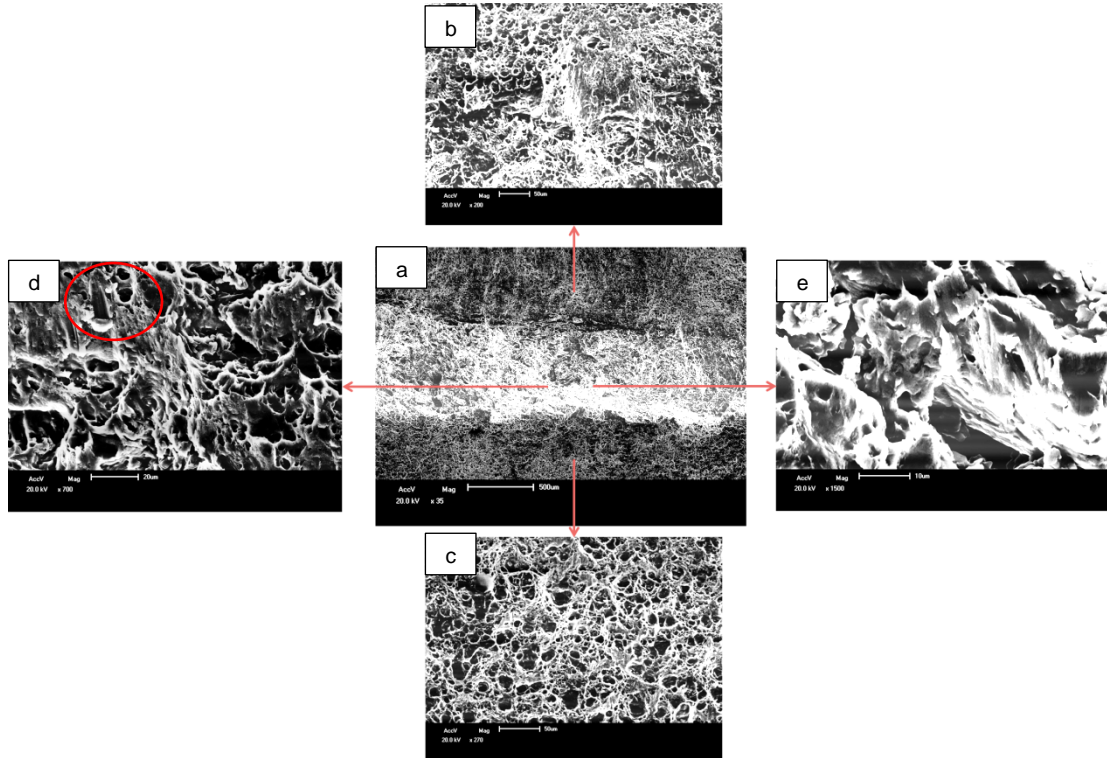
Fonte: O Autor

Figura 25- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 11: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura, e) deformação da zona central em maiores detalhes, f) severa deformação plástica do material na zona central de fratura em maior detalhe.



Fonte: O Autor

Figura 26- Análise em MEV da superfície de fratura após ensaio de tração da amostra 13: a) visão geral da superfície de fratura, b) dimples da parte superior da fratura, c) dimples na parte inferior da fratura, d) deformação da zona central da fratura com a presença de microcavidades, e) deformação da zona central em maiores detalhes.

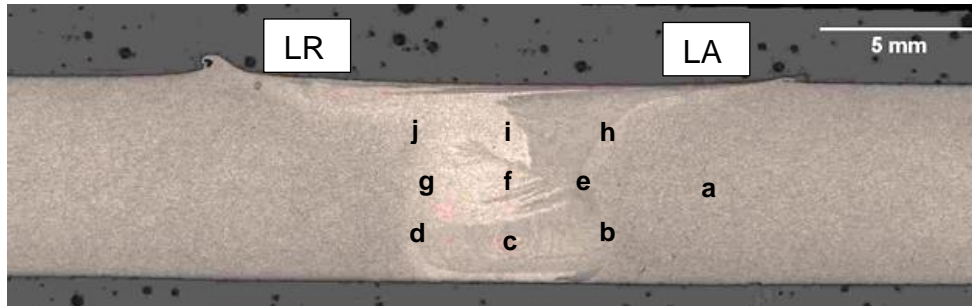


Fonte: O Autor

5.4 Análise Microestrutural

A avaliação das características microestruturais é de grande importância em juntas soldadas realizadas pelo processo FSW. Permite verificar as regiões formadas pelas diferentes influências da fricção da ferramenta com o material, além disso, auxilia na análise de suas propriedades, como o comportamento mecânico. A Figura 27 mostra de forma esquemática as regiões de micrografias que serão abordadas no trabalho.

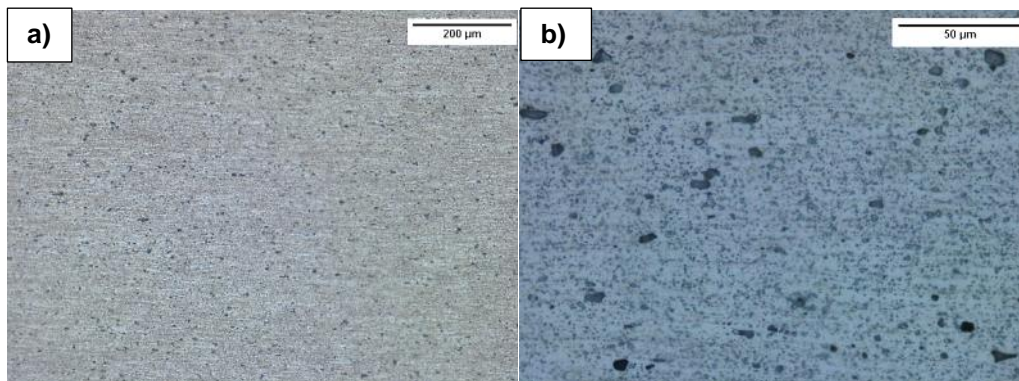
Figura 27 - Macrografia esquemática demonstrando os locais das microestruturas representadas no trabalho, sendo a) Metal Base (MB), b) Interface entre o lado de avanço (LA) e a zona de mistura raiz, c) Zona de mistura raiz (*onion rings*), d) Interface entre o lado de retrocesso (LR) e zona de mistura raiz, e) Interface entre LA e ZM centro, f) ZM centro e g) Interface entre LR e ZM centro, h) Interface entre LA e ZM topo, i) ZM topo e j) Interface entre LR e ZM topo.



A metalografia foi realizada na solda que obteve os melhores resultados no ensaio de tração, portanto as micrografias representadas abaixo são referentes a solda 13.

Na Figura 28 pode ser observado as micrografias da região “a”. Essa região representa a parte que não foi afetada pelo processo de soldagem. As micrografias representadas na Figura 28 apresentam uma microestrutura típica da liga AA 5083 laminada. Esta região está composta por grãos e precipitados alongados distribuídos na matriz em tamanhos variados. A região do metal base pode apresentar baixa densidade de discordâncias e grande concentração de pequenos precipitados, onde os precipitados maiores são, geralmente, constituídos de Al, Mn e Fe (SATO; PARK; KOKAWA, 2001).

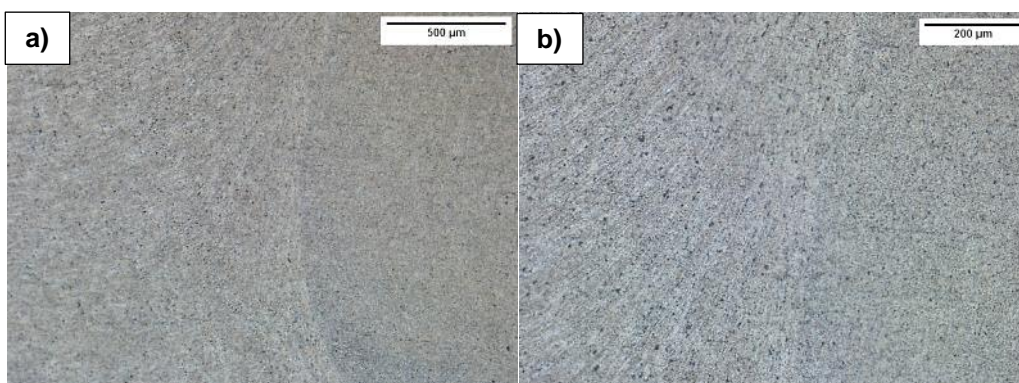
Figura 28 – Micrografia da região "a". Microestrutura do metal base para a liga AA 5083 laminada. a) Visão geral da microestrutura. b) detalhe dos precipitados Al₆MnFe (maiores) e AlMgSi (menores) alinhados com o sentido de laminação. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



Fonte: O Autor

Na microestrutura representada na Figura 29 está demonstrada a região Termomecanicamente afetada (ZTMA) do lado de avanço (LA) da solda. Nessa região há uma severa deformação do material causada pela rotação do pino da ferramenta. É uma região de interface que segundo (SATO; PARK; KOKAWA, 2001) tem maior densidade de discordâncias que no metal base, mas em menor quantidade comparado ao material submetido a um trabalho mecânico (por exemplo da condição H1).

Figura 29 - Micrografias da região "b". Microestrutura na região de interface da ZTMA com LA. a) Visão geral da região. b) Em maior detalhe observando-se os precipitados acompanhando o fluxo de material. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.

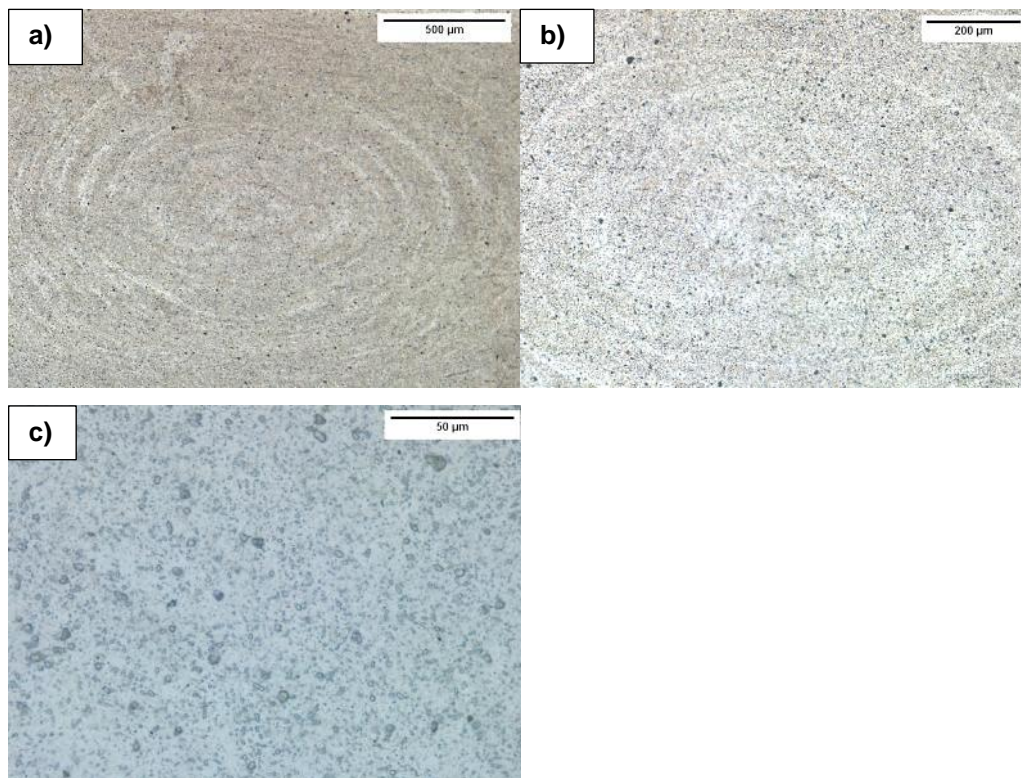


Fonte: O Autor

Na Figura 30 estão representadas as micrografias da região de mistura mais especificamente os *onion rings*, essa região é típica de uniões soldadas

pelo processo FSW, porém, de acordo com RAO et al. (2013) ainda não há um princípio consolidado sobre sua formação, mas alguns estudos podem ser encontrados na literatura (NANDAN et al., 2007) (GUERRA et al., 2002) (COLLIGAN, 1999). Segundo Sato et al. (2001) a região de mistura apresenta precipitados maiores quando comparados com as outras zonas, ademais o tamanho de grão nessa região tende a ser mais refinado do que nos outros locais. Ainda alguns grãos apresentam elevada quantidade de discordâncias no seu interior isso sugere que o refinamento de grão é realizado através da recuperação dinâmica.

Figura 30 - Micrografia da região "c". Microestrutura típica de uniões soldadas pelo processo FSW apresenta os *onion rings* e precipitados distribuídos. a) visão geral dos *onion rings*. b) maior detalhe dos *onion rings*. c) região bem no centro dos *onion rings* apresentando os precipitados em maior detalhe. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.

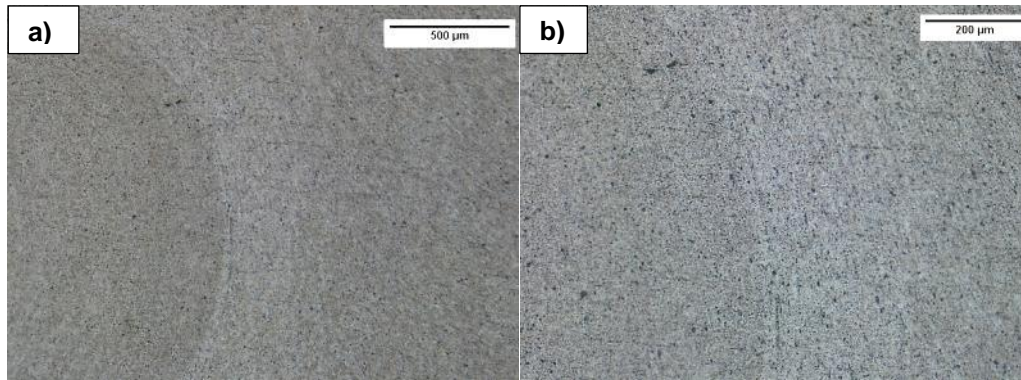


Fonte: O Autor

As imagens da Figura 31 mostram a região Termomecanicamente afetada do lado de retrocesso da solda, se observa a interface entre a mesma e a zona de mistura, porém esta é mais homogênea quando comparada com o

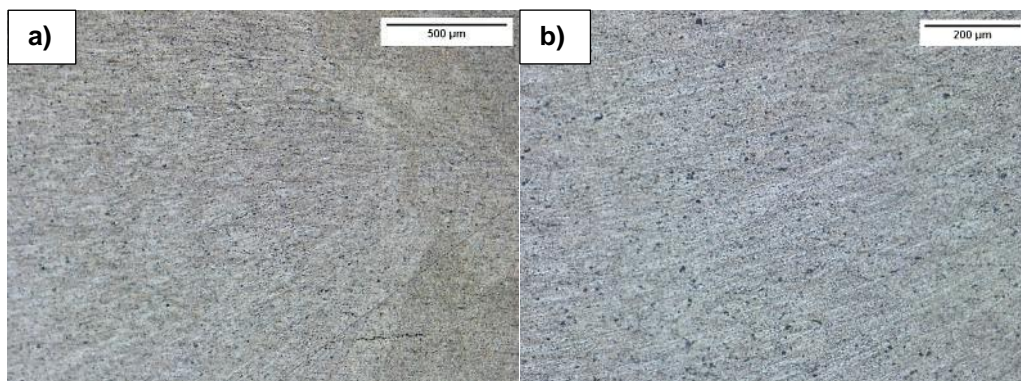
lado de avanço. Também se nota severa deformação do material devido ao movimento linear e de rotação da ferramenta.

Figura 31 - Micrografias da região "d". Microestrutura interface entre a ZTMA e LR. a) Visão geral da região de interface. b) maior detalhe se observa o alinhamento dos precipitados com a deformação do material. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



A Figura 32 mostra a microestrutura da região onde ocorre o encontro da zona Termomecanicamente afetada do lado de avanço com a zona de mistura central da união soldada. Nessa área foi onde se formaram os vazios nas outras juntas soldadas, neste caso apresenta uma boa consolidação, confirmando a boa qualidade da união.

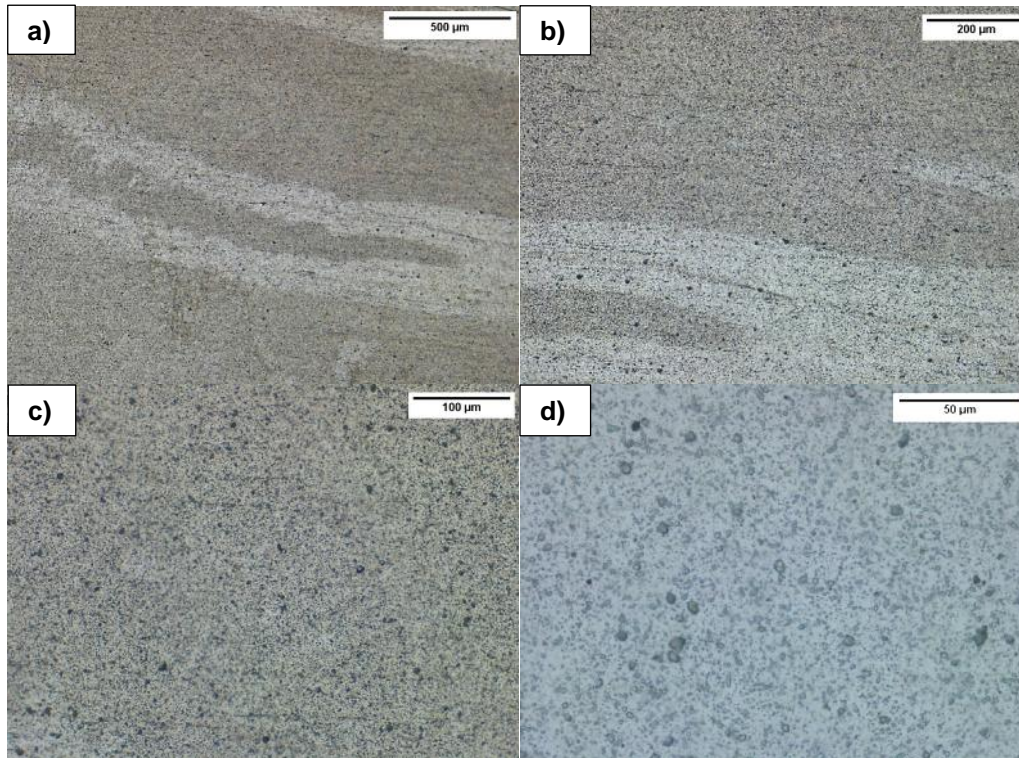
Figura 32 - Micrografias da região "e". Microestrutura da região entre a ZM e LA no centro da solda apresenta severa deformação do material. a) Visão geral demonstrando a interface. b) em maior detalhe o fluxo de material proveniente do processo de soldagem. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



Fonte: O Autor

A Figura 33 apresenta a microestrutura da região de mistura bem no centro da união soldada, um pouco acima dos *onion rings*, assim podendo observar o fluxo de material central. Nessa área se verifica a mistura do material causada pelo movimento da ferramenta

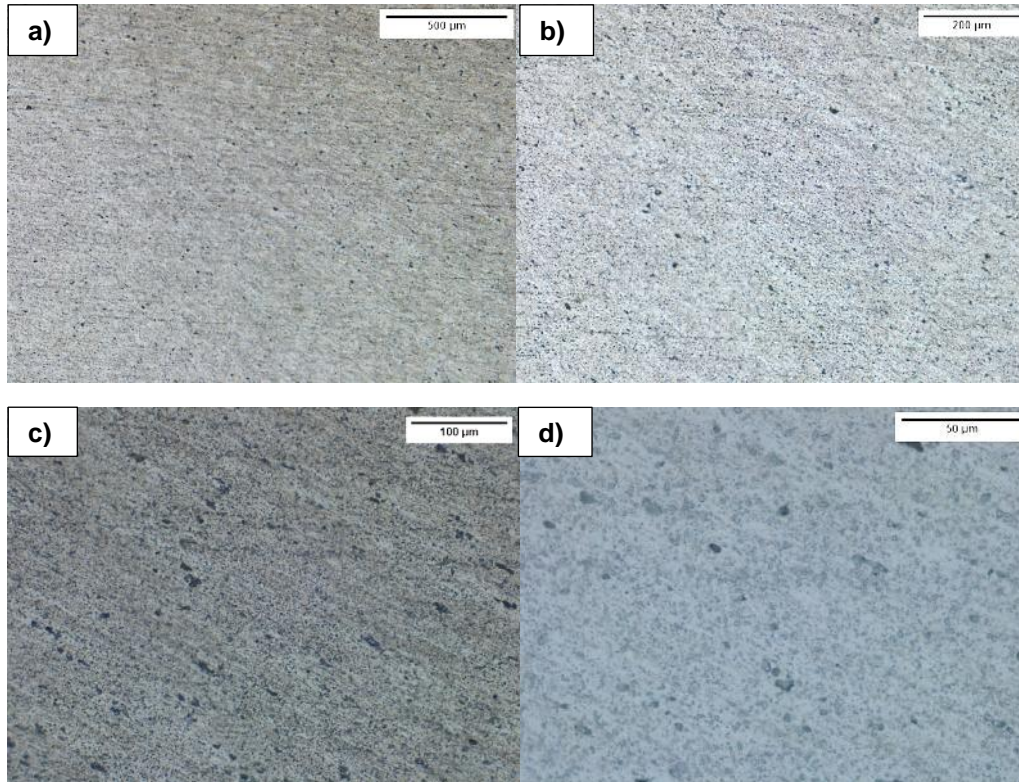
Figura 33 - Micrografias da região "f". Microestrutura da ZM no centro da união soldada. a) visão geral da ZM na posição central da união soldada. b) microestrutura da ZM central com fluxo de material causado pelo movimento de rotação da ferramenta. c) microestrutura da ZM central em maior detalhe. d) em maior detalhe precipitados da Zm central. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



Fonte: O Autor

A Figura 34 mostra a microestrutura da região onde ocorre o encontro da zona Termomecanicamente afetada do lado de retrocesso com a zona de mistura central da união soldada. Como nas outras áreas apresenta os precipitados distribuídos na matriz, nessa região se destaca a deformação sofrida pelo material e também que não há uma interface bem definida entre a ZTMA e a ZM.

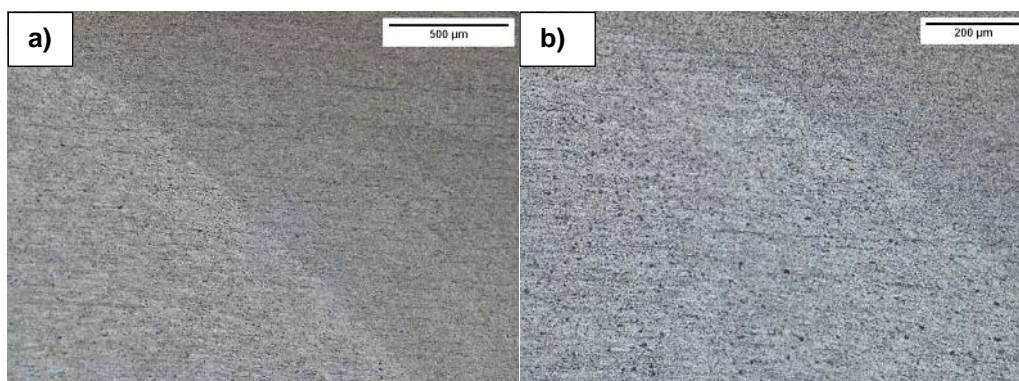
Figura 34 - Micrografias da região "g". Microestrutura entre ZM central e LR demonstrando a deformação do material. a) visão geral da microestrutura na interface entre ZM e LR bem no centro da união soldada. b) microestrutura na interface entre ZM e LR central demonstrando o fluxo do material. c) fluxo de material com precipitados em maior detalhe. d) microestrutura em maior detalhe com precipitados acompanhando o fluxo de material . Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



Fonte: O Autor

As micrografias da Figura 35 mostram a interface entre a ZTMA do lado de avanço de soldagem com a zona de mistura superior a qual também é chamada de zona de fluxo do ombro da ferramenta do lado de avanço. Nessa região se observa a interface bem definida entre as zonas, porém comparando com essa região mais abaixo (zona "b") percebe-se uma menor deformação microestrutural da ZTMA.

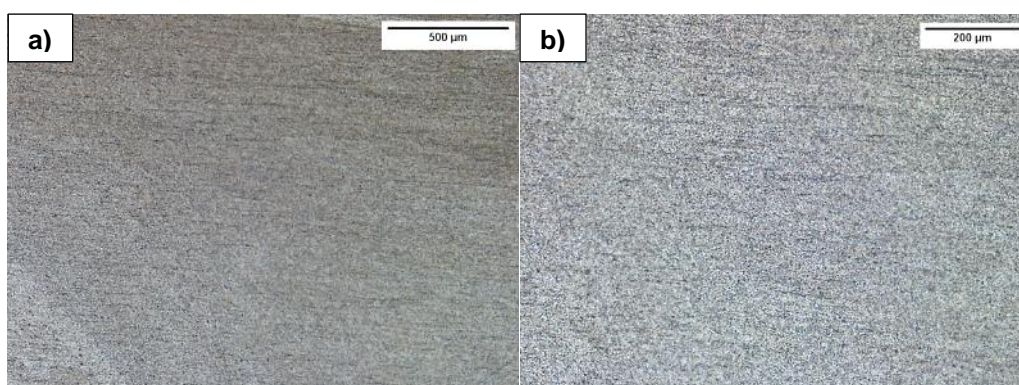
Figura 35 - Micrografias da região "h". Microestrutura na interface entre o LA e a ZM na parte superior da união soldada. a) Visão geral da interface entre as ZM e LA. b) interface em maior detalhe. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.

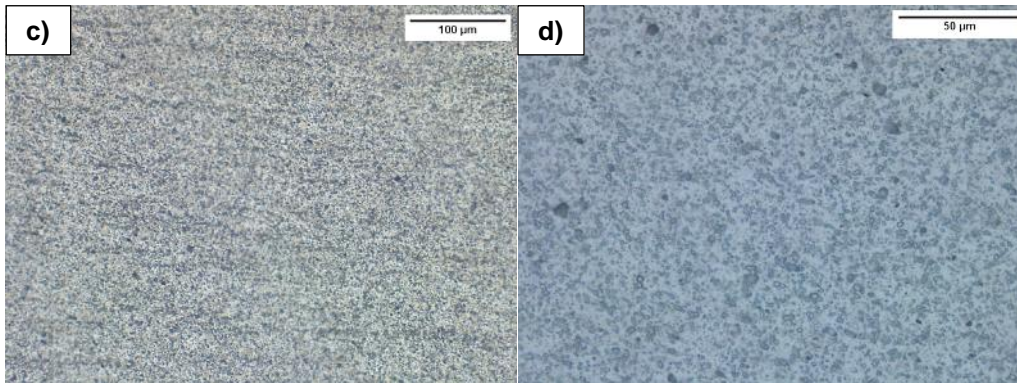


Fonte: O Autor

A região da ZM de topo ou também considerada Zona de fluxo do ombro da ferramenta (Figura 36) apresenta uma microestrutura semelhante a representada na Figura 33 da região da zona de mistura central. Apresenta precipitados distribuídos na matriz e severa deformação do material.

Figura 36 - Micrografias da região "i". Microestrutura na ZM na parte superior da união soldada. a) visão geral demonstrando o fluxo de material. b) microestrutura da ZM superior em maior detalhe. c) microestrutura com grande presença de precipitados. d) em maior detalhe precipitados presentes nessa região. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.

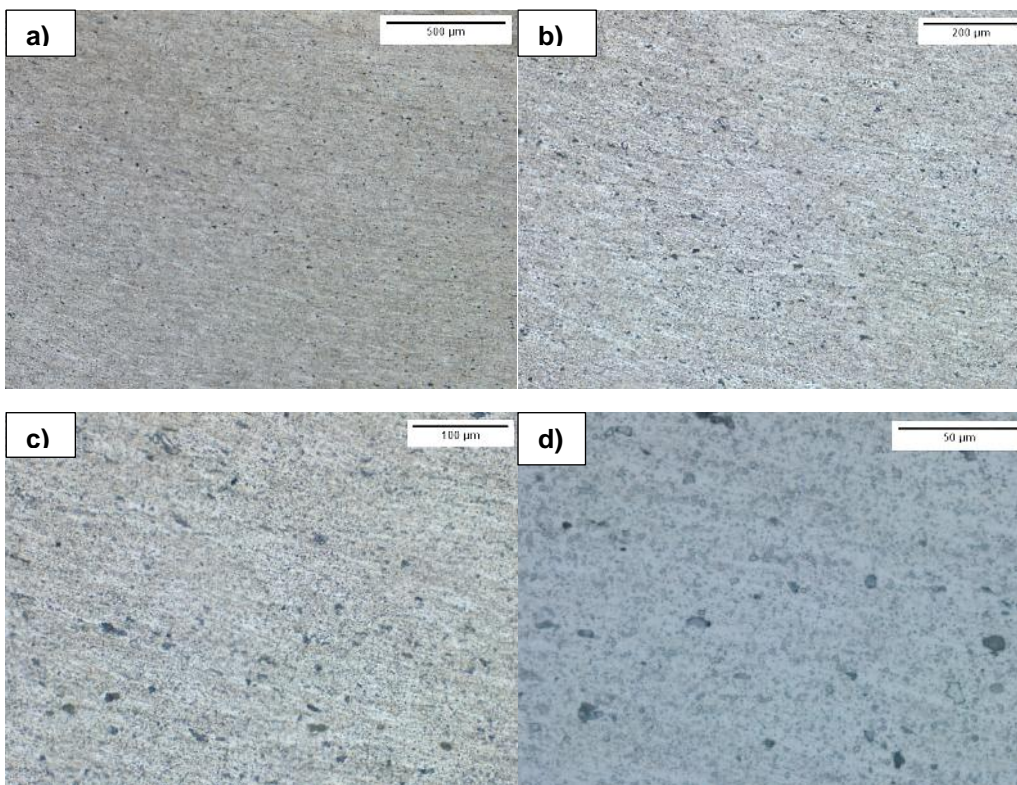




Fonte: O Autor

Por fim, a Figura 37 demonstra a ZTMA do LR e a ZM de topo, nessa região a microestrutura está mais semelhante a do metal base, porém ainda apresenta certa deformação sendo essa menor quando comparada às áreas mais próximas aos *onion rings*.

Figura 37 - Micrografias da região "j". Microestrutura entre a ZM e o LR de solda. a) visão geral da zona de interface entre ZM e LR da união soldada. b) em maior detalhe o fluxo de material do LR da união soldada. c) microestrutura com a presença de precipitados. d) em maior detalhe os precipitados dessa região. Microscopia ótica. Ataque com reagente Keller.



Fonte: O Autor

A partir das metalografias se verifica que não foram observadas trincas nem vazios o que confirma a boa qualidade da união soldada com os parâmetros de 1100 rpm de rotação, 30 mm/min de avanço e a posição 1. Como já discutido anteriormente, não foi observada uma zona afetada pelo calor, provavelmente por se tratar do material base AA 5083 no estado recozido e o ciclo térmico do processo não afetar significativamente sua microestrutura.

Foram observados precipitados distribuídos em todas as regiões e a severa deformação do material nas regiões de solda. A interface entre a zona de mistura e o lado de avanço de soldagem apresentou uma transição mais heterogênea de microestruturas. Gerando uma região de maior concentração de tensões quando comparada com a interface entre a zona de mistura e o lado de retrocesso da solda que apresenta uma maior homogeneidade.

6. CONCLUSÕES

Após a variação, estudo dos parâmetros de soldagem e realização de juntas soldadas pelo processo FSW de chapas da liga e alumínio AA 5083-O com 6,35 mm de espessura, utilizando-se uma ferramenta de aço AISI H13 inclinada em 2,5°, com variações nas velocidades de rotação, avanço e posição de soldagem, foi concluído que:

- Com a combinação adequada de parâmetros é possível obter uniões soldadas pelo processo FSW com mistura homogênea e isentas de defeitos;
- A partir da matriz de parâmetros soldada nesse trabalho uma das melhores combinações de parâmetros foi a com rotação de 1100 rpm, velocidade de avanço 30 mm/min e posição 1 (0,2 mm de penetração do ombro da ferramenta);
- A posição de soldagem 2 (0,15 mm de penetração da ferramenta) juntamente com os maiores valores de rotação (1200 e 1300) e de velocidades de avanço (30 e 35 mm/min), não demonstraram serem boas combinações de parâmetros, pois as juntas soldadas apresentaram consideráveis defeitos;
- A inspeção visual e macrográfica das soldas permitem concluir que o excesso de rebarbas foi preferencialmente formado do lado de retrocesso das juntas soldadas e o vazio interno no lado de avanço;
- Os perfis de microdureza demonstraram uma dureza homogênea e semelhante em toda extensão analisada, desde material base e zonas de solda, sendo os valores variados entre 65 e 85 HV;
- O ensaio de dobramento demonstrou que a posição de soldagem 1 (penetração de 0,2 mm) obteve o melhor desempenho dentre as posições variadas e ensaiadas;

- Os ensaios de tração demonstraram que as juntas soldadas obtiveram desempenho satisfatório, apresentando valores de limite de escoamento em média 85% quando comparados ao metal base, alongamento igual ou até superior no caso da amostra 11 e por fim, limites de resistência iguais ou até superiores ao metal base (290 MPa);
- Os corpos de prova do ensaio de tração falharam no mesmo local: do lado de avanço da solda. O modo de fratura foi predominantemente dúctil e ocorreu através da coalescência de vazios, provavelmente, devido à presença das partículas de segunda fase;
- As micrografias comprovaram a isenção de defeitos e a boa qualidade da união soldada 13;
- A partir das metalografias se verificou uma microestrutura típica de uniões soldadas pelo processo FSW na qual se encontra na zona de mistura os *onion rings* e ainda com a ausência de uma zona afetada pelo calor;
- A microestrutura do material apresentou precipitados distribuídos em todas as regiões e a severa deformação do material causada pelo movimento rotacional e transversal da ferramenta.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da influência de outros parâmetros nas uniões soldadas, como a força aplicada;
- Realizar ensaios de fadiga nas uniões soldadas;
- Realizar ensaio de microtração nas diferentes zonas de soldagem para compará-las;
- Realizar a análise EBSD nas juntas soldadas para verificar o tamanho e morfologia do grão nas diferentes zonas;
- Realizar ensaios de voltametria para testar a resistência a corrosão das juntas soldadas;
- Análise dos tipos e quantidade dos precipitados em cada zona da união soldada.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Aplicações Do Alumínio: Automotivo E Transportes.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Aplicações Do Alumínio: Automotivo E Transportes.** CONTRIBUIÇÃO SUSTENTÁVEL. Disponível em: <<http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/contribuicao-sustentavel>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Características Químicas E Físicas.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas>>. Acesso em: 6 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Fundamentos E Aplicações Do Alumínio.** São Paulo, Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6834: Alumínio e suas ligas - Classificação da Composição Química.** 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6835: Alumínio e suas ligas - Classificação das Têmperas.** 2000.

ALMEIDA, T. D. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O.** Trabalho de conclusão de curso. UNIJUÍ. Brasil. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** 2013.

BAOHUI, T. **Ageing effect on serrated flow in Al-Mg alloys.** Materials Science and Engineering A, v. 349, p. 272-278, 2002.

BENZERGA, A. A. **Micromechanics of Coalescence in Ductile Fracture.** Journal of Mechanics and physics of solids, v. 50, p. 1331-1362, 2002.

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

ÇAM, G. **Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys.** Int. Mater. Rev., 56, No. 1, p. 1, 2011.

CERVEIRA, R. L. L. P. **Caracterização experimental do comportamento mecânico sob sollicitação 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, Z. W.; PASANG, T.; QI, Y. **Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O**. Materials Science and Engineering A, v. 474, n. 1-2, p. 312–316, 2008.

COLLIGAN, K. **Material flow behavior during friction stir welding of aluminum**. Welding journal. AWS- American Welding Society, 1999.

CRAWFORD, R. et al. **Experimental defect analysis and force prediction simulation of high weld pitch friction stir welding**. Science and technology of welding and joining, v. 11/6, p. 657-665, 2013.

D'URSO, G. et al. **The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys**. Procedia Engineering, v. 183, p. 270–276, 2017.

DARRAS, B. M. et al. **Materials Science & Engineering A Analysis of damage in 5083 aluminum alloy deformed at different strain rates**. Materials Science & Engineering A, v. 568, p. 143–149, 2013.

DIXON, R. Brazing and soldering: ASM Handbook. **Brazing and Soldering. United States: Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding**. ASM Internacional, 1994.

FERREIRA, S. L. C. et al. **Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods**. Analytica Chimica Acta. 597. p. 179-186, 2007.

GIVI, M. K. B. e ASADI P. **Advances in Friction Stir Welding and Processing**. Woodhead Publishing. Cambridge. 2014.

GRIMM, A. et al. **Friction Stir welding of Light Metals for Industrial Applications**. Materials Today: Proceedings, v. 2, p. 169–178. 2015.

GUERRA, M. et al. **Flow patterns during friction stir welding**. Materials Characterization, v. 49, p. 95-101, 2002.

International Organization for Standardization. **ISO 25239-5: Friction Stir Welding – Aluminium- Part 5: Quality and inspection requirements**, 2011.

International Organization for Standardization. **ISO 5173: Destructive tests on welds in metallic materials - Bend test**, 2009.

JUNIOR, A. F. et al. **Solda por Fricção linear (FSW – FRICTION STIR WELDING) na indústria aeronáutica**. Infosolda. FATEC-SP, p. 1–32, 2013.

KADAGANCHI, R.; REDDY, M.; GOKHALE, H. **Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology**. Defence Technology, v. 11, n. 3, p. 209–219, 2015.

KAH, P. et al. **Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys.** International Journal of Mechanical and Materials Engineering, v. 10, n. 1, p. 26, 2015.

KALLEE, S. **Application of friction stir welding in the shipbuilding industry.** TWI. The Royal Institution of Naval Architects, Londres, 2009.

KEIVANI, R., et al. **Effects of pin angle and preheating on temperature distribution during friction stir welding operation.** Transactions of Non Ferrous Metals Society of China, 23, 2708–2713. 2013.

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

KOILRAJ, M. et al. **Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique.** Materials and Design, v. 42, p. 1–7, 2012.

KULKARNI, B. S.; PANKADE, S. B. **Effect of backing plate material diffusivity on microstructure , mechanical properties friction diffusivity stir welded joints : A Review.** Procedia Manufacturing, v. 20, p. 59–64, 2018.

KUMAR, N. et al. **An investigation of Friction During Friction Stir Welding of Metallic Materials.** Materials and Manufacturing Processes. v. 24. p. 438-445. 2009.

KUMBHAR, N. T.; DEY, G. K. **Friction Stir Welding of Aluminium Alloys.** Research article. BARC Newsletter. n. 321, p. 11–17, 2011.

LEAL, R.; LOUREIRO, A. **Defects Formation in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys.** Materials Science Forum. v. 456, p. 299–302, 2004.

LEITÃO, C. et al. **Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 tailored blanks.** Materials and Design, v. 30, n. 8, p. 3235–3242, 2009.

MENZEMER, C.; SRIVATSAN, T. S. **The quasi-static fracture behavior of aluminum alloy 5083.** Materials Letters, v. 38(5), p. 317–320, 1999.

METALS HANDBOOK. **Vol. 2: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**, 10a, ASM Int, 1990.

METALS HANDBOOK **Vol. 3: Alloy phase diagram**, ASM Int, 1992.

METALS HANDBOOK. **Vol. 6: Welding, brazing and soldering**, ASM Int, 1993.

METALS HANDBOOK **Vol. 9: Metallography and Microstructures**, 9a ed., ASM Int, 1985.

MILLER, W. S. et al. **Recent development in aluminium alloys for the automotive industry**. Materials Science and Engineering A, v. 280, n. 1, p. 37–49, 2000.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. ASM International, Estados Unidos, 2007.

MISTIKOGLU, S. **Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys**. v. 23, June, p. 1936–1953, 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 3. John Wiley & Sons, 1991. ISBN 9780470128664.

NANDAN, R. et al. **Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel**. Acta Materialia, v. 55, p. 883-895, 2007.

PADMANABAN, R.; BALUSAMY, V.; NOURANGA, K. N. **Effect of process parameters on the tensile strength of friction stir welded dissimilar aluminum joints**. Journal of Engineering Science and Technology, v. 10, n. 6, p. 790–801, 2015.

PAULA, D. et al. **Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I : Variáveis de Processo**. v. 9, n. 3, 2017.

PEEL, M. et al. **Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds**. Acta Materialia, v. 51, n. 16, p. 4791–4801, 2003.

PODRZAJ, P.; JERMAN, B.; KLOBCAR, D. **Welding defects at friction stir welding**. Metalurgija, v. 54, n. 2, p. 387–389, 2015.

PRADEEP, A.; MUTHUKURAMAN, S. **An analysis to optimize the process parameters of friction stir welded low alloy steel plates**. International Journal of Engineering, Science and Techonology. v. 5, n. 3, p. 25-35, 2013.

RAJAMANICKAM, N.; BALUSAMY, V. **Effects of process parameters on mechanical properties of friction stir welds using design of experiments**. Indian Journal of Engineering & Materials Science, v. 15, p. 293-299, 2008.

RAO, D. et al. **Asymmetric mechanical properties and tensile behaviour prediction of aluminium alloy 5083 friction stir welding joints**. Materials Science and Engineering A, v. 565, p. 44–50, 2013.

SANTOS, T; VILAÇA, P; QUINTINO, L. **Developments in NDT for detecting imperfections in friction stir welds in aluminium alloys**. Welding in the World. v. 52(9-10):30-37. 2008.

SATO, Y. S.; PARK, S. H. C.; KOKAWA, H. **Microstructural Factors Governing Hardness in Friction-Stir Welds of Solid-Solution-Hardened Al**

Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 32, n. December, p. 3033–3042, 2001.

SCHROEDER, G. J.; BUZZATTI, D.; AMAVISCA, V. C.; REGULY, A. **Aproximação de intervalo de parâmetros para soldas por fricção e mistura mecânica a partir de software Minitab.** SIC- UFRGS. 2018.

SILVA A. C. F.; BACKER J.; BOLMSJO G. **Temperature measurements during Friction Stir Welding.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. p. 2899- 2908. 2017.

SIVA, D.; SHANMUGAPRIYA S.; SARANYA, P. **Experimental Investigation on Friction Stir Welding of AA 6061 Aluminium Alloy Using Response Surface Methodology.** International Journal of Innovations and Advances in Science Engineering and Technology, v. 1, 2016.

SREE SABARI, S.; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. **Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed.** Journal of Manufacturing Processes, v. 22, p. 278–289, 2016.

TAYLOR, P.; HORI, H.; HINO, H. **Application of friction stir welding to the car body.** Journal of Light Metal Welding and Construction, v. 17, p. 37–41, 2010.

THOMAS, M. W. et al. International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.

THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D. **Friction stir welding for the transportation industries.** Materials & Design, v. 18, n. 4/6, p. 269-273, 1997.

THREADGILL, P. L. Science and Technology of Welding and Joining, 12. p. 357-360. 2007.

THREADGILL, P. L. et al. **Friction Stir Welding of aluminium alloys.** International Materials Reviews. 54:2. 49-93. 2013.

TOKARSKI, T.; WZOREK, L.; DYBIEC, H. **Microstructure and plasticity of hot deformed 5083 aluminium alloy produced by rapid solidification and extrusion.** Archives of metallurgy and materials. v. 57. 2012.

TOTTEN, E. G.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum; Volume 1: Physical Metallurgy and Processes.** 2003.

TRONCI, A et al. **Microstructural and mechanical characterisation of 5XXX-H111 friction stir welded tailored blanks.** Science and Technology of Welding and Joining, v. 16, n. 5, p. 433–439, 2011.

TRUMMER, R. V.; SUZANO, E.; BELTRÃO, M.; ROOS, A.; SANTOS, J. F.; CASTRO, P. M. S. T. **Influence of the FSW clamping force on the final distortion and residual stress field**. Materials Science and Engineering A, v. 538, p. 81-88, 2012.

VALIEV, R.Z. et al. **Superior Strength in Ultrafine-Grained Materials Produced by SPD Processing**. Materials Transactions. v. 55, p. 13-18, 2010.

VIJAYAN, S.; RAJU, R.; RAO, S. R. K. **Multiobjective optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy AA 5083 using taguchi-based grey relation analysis**. Materials and Manufacturing Processes, v. 25, n. 11, p. 1206–1212, 2010.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sergio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blücher, c1992. 494 p. ISBN 9788521202387.

WALTER, N. et al. **Estudo sobre o desgaste de ferramentas no processo de Friction Stir Welding**. XLIII CONSOLDA- Congresso Nacional de Soldagem. Brasil. 2017.

ZHANG, H.; LIU, H. **Mathematical model and optimization for underwater friction stir welding of a heat-treatable aluminum alloy**. Journal of materials & design, v. 45, p. 206–211, 2013.